



**António Pedro Martins Ribeiro da Silva**

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

**Impacte de argamassas com pellets de madeira  
no desempenho energético de um edifício  
residencial – modelação numérica e experimental**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Prof. Doutor Luís Gonçalo Correia Baltazar,  
Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade Nova de Lisboa

Presidente: Prof. Doutor Carlos M. Chastre Rodrigues  
Arguente: Prof. Doutor Fernando Jorge Fernandes Jorne  
Vogal: Prof. Doutor Luís Gonçalo Baltazar



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro 2017**



Copyright © António Pedro Martins Ribeiro da Silva, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.





*Aos meus pais, obrigado por tudo.*







## Agradecimentos

Antes de mais, quero agradecer a todas as pessoas que, de alguma forma, direta ou indiretamente, me ajudaram na realização desta dissertação e também durante todo o meu percurso académico.

Primeiramente, quero agradecer ao Professor Luís Baltazar, orientador científico da minha dissertação, por toda a disponibilidade, paciência perante as minhas dúvidas e questões, partilha de conhecimentos e sobretudo pela confiança que depositou em mim.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, por todo o conhecimento transmitido, ao longo de todo o meu percurso académico.

Ao Eng.<sup>o</sup> Vítor Silva, do DEC da FCT-UNL, por toda a disponibilidade, e ajuda prestada no laboratório, pelos conhecimentos, e pelas lições que me transmitiu.

À anTUNiA – Tuna de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, e aos seus membros, pelas amizades, aventuras, bons momentos, mas também pela formação concedida tanto a nível musical, como pessoal.

Aos meus amigos, Ana, Sara, André, Rita, Francisco, Rui, Andreia, Filipe, João, Gonçalo, um enorme agradecimento por toda a ajuda, apoio, amizade e companheirismo durante estes anos, sem vocês não teria sido a mesma coisa.

À minha namorada, Andreia Fernandes, um especial agradecimento pela constante paciência e apoio demonstrados aos longos destes meses, nunca me deixando ir abaixo e incentivando-me sempre a continuar.

Por fim resta-me agradecer à minha família, ao meu pai António, à minha mãe Guilhermina, à minha tia Teresa, ao meu tio Vítor e à minha tia São. Aos meus tios, agradeço imenso todas as ajudas que me concederam, nunca irei esquecer. Aos meus pais, agradeço todos os sacrifícios que fizeram por mim, sem eles não seria possível a minha formação universitária, estarei eternamente grato.



## Resumo

Com o decorrer dos tempos, tendo vindo a crescer, cada vez mais, a preocupação com o meio ambiente, com os recursos naturais e a sua sustentabilidade. Uma das maiores preocupações assenta, no sector da construção civil, visto que este, tem um impacte bastante negativo no meio ambiente, devido, sobretudo, ao grande consumo de recursos naturais e à grande produção de resíduos. De modo a combater essas problemáticas, nos últimos anos, tem sido comum o aproveitamento dos resíduos provocados pela indústria em argamassas de construção. Implementados nas argamassas como adição ou como substituição parcial do agregado (ou em certos casos do ligante), os resíduos modificam as argamassas, podendo melhorar certas características, como por exemplo a condutibilidade térmica da mesma.

Os pellets de madeira constituem um tipo de combustível biomassa provenientes da indústria de transformação de madeira, sendo por isso considerado um resíduo. Portugal é um dos países onde existem várias fábricas centradas no tratamento da madeira e derivados, o que provoca a existência de um grande número de resíduos, com os quais é possível fabricar os pellets de madeira.

A presente dissertação pode ser dividida em duas partes: uma primeira parte que corresponde a uma caracterização experimental e uma segunda parte que engloba uma análise numérica.

Na campanha experimental são caracterizadas argamassas de cal hidráulica HL 5 com a incorporação de pellets de madeira no seu fabrico. A adição dos pellets é feita em substituição do agregado (areia), tendo sido realizadas várias percentagens, nomeadamente 4, 9, 15 e 23%. Foi ainda realizada uma argamassa de referência sem pellets, sendo que todas as argamassas foram realizadas ao traço 1:3, e com diferentes relações de água/ligante. Esta caracterização permitiu demonstrar que a adição de pellets, melhora substancialmente a condutibilidade térmica das argamassas, tendo sido obtidos valores bastante reduzidos.

Na análise numérica, com recurso ao software *EnergyPlus*, foi criado um modelo, simulando a aplicação das argamassas previamente estudadas nas fachadas de um edifício residencial. Foi simulada a aplicação das argamassas em várias soluções construtivas de paredes exteriores com as espessuras de 4, 6 e 8 cm. Além disso, foi estudada uma solução com aplicação de pellets de madeira na camada de forma da cobertura, e foram conjugadas as diversas soluções. Esta análise mostrou que é possível obter reduções superiores a 50 % (face à solução base) ao nível das necessidades energéticas de aquecimento, mas no entanto, com ligeiros aumentos ao nível das necessidades energéticas de arrefecimento.

Em termos globais, demonstrou-se que a aplicação destas argamassas pode ter grandes benefícios a nível do desempenho térmico dos edifícios, o que incentiva a comunidade científica a uma mais profunda investigação, de modo a apurar a viabilidade da produção deste tipo de argamassas.

**Palavras-chave:** Pellets de madeira, argamassas, resíduos, cal hidráulica, necessidades energéticas, sustentabilidade.



## Abstract

In the recent times, the concern with the environment, the natural resources and their sustainability, is growing increasingly. One of the big concerns rests in the construction sector, because it has a very negative impact in the environment, consuming large portions of natural resources, and producing a large amount of waste. In order to solve this problem, in the last years, it became common, the exploitation of industrial waste in building mortars. The waste materials can be introduced in mortars, as an addition or as a partial substitution of the aggregate (in some cases, the binder) and may improve certain proprieties of the mortar, such as thermal conductivity.

Wood pellets, are a biomass fuel, which comes from wood industry, being therefore a waste. Portugal is one of the countries that has many factories dealing with the production and treatment of wood and its derivatives, which causes a large amount of wastes, which allow the production of wood pellets.

The present dissertation can be divided in two parts: the first corresponds to an experimental characterization and the second to a numerical analysis.

In the experimental campaign, are characterized HL 5 hydraulic lime mortars with the incorporation of wood pellets. The replacement of the aggregate (sand) by wood pellets, were made, using different dosages, such as 4, 9, 15 and 23 %. A reference mortar without pellets was also made, and all mortars were made in the ratio of 1:3 (binder:aggregate) and with different water/binder ratios. This characterization showed that the addition of pellets substantially improves the thermal conductivity of the mortars.

In the numerical analysis, a model was created using a software called *EnergyPlus* in order to simulate the application of the previously studied mortars on the facades of a residential building. The application of the mortars was made using several constructive solutions of exterior walls, and it was also simulated various thicknesses, namely 4, 6 and 8 cm. In addition, a solution with the application of wood pellets in the constructive solution of the roof was studied. This analysis showed that it can be achieved reductions of over 50 % (in the relation to the reference solution), regarding the heating energy needs, but with slight increases in the energy needs for cooling.

Overall, it has been demonstrated that the application of these mortars can have great benefits in the thermal performance of buildings, which encourages the scientific community to further investigate these mortars, in order to ascertain the viability production of this type of mortars.

**Keywords:** Wood pellets, mortars, waste, hydraulic lime, energy needs, sustainability.



## Índice de texto

1	Introdução.....	1
1.1	Motivação e enquadramento do tema.....	1
1.2	Objetivos.....	1
1.3	Estrutura .....	2
2	Estado do Conhecimento .....	3
2.1	Introdução.....	3
2.2	Argamassas.....	3
2.2.1	Enquadramento histórico .....	3
2.2.2	Classificação das argamassas .....	4
2.2.2.1	Argamassas industriais .....	4
2.2.2.2	Argamassas industriais semi-acabadas.....	4
2.2.2.3	Argamassas tradicionais .....	5
2.2.3	Argamassas de construção .....	5
2.2.3.1	Tipos de Argamassas de construção .....	5
2.2.3.2	Argamassas de revestimento .....	5
2.3	Constituintes das argamassas .....	6
2.3.1	Agregados .....	6
2.3.2	Ligantes inorgânicos.....	7
2.3.2.1	Cimento .....	7
2.3.2.2	Cais.....	8
2.3.2.3	Gessos.....	8
2.3.3	Água .....	9
2.3.4	Adjuvantes.....	9
2.3.5	Adições.....	10
2.4	Pellets de madeira (wood pellets) .....	10
2.4.1	Introdução.....	10
2.4.2	Características.....	11
2.4.3	Fabrico.....	11
2.4.4	Influência da incorporação de pellets de madeira em argamassas .....	13
2.5	Argamassas com incorporação de resíduos .....	13
2.5.1	Tipos de resíduos .....	14
2.5.2	Estudos realizados .....	15
3	Caracterização do comportamento higratérmico de edifícios.....	19
3.1	Introdução.....	19
3.2	Fenómenos de transmissão de calor .....	19
3.2.1	Transmissão de calor por condução .....	20
3.2.2	Transmissão de calor por convecção.....	21
3.2.3	Transmissão de calor por radiação .....	22

3.3	Caracterização do comportamento térmico dos edifícios .....	22
3.3.1	Conforto térmico .....	22
3.3.2	Balanço térmico.....	24
3.3.2.1	Ganhos solares .....	24
3.3.2.2	Ganhos Internos .....	25
3.3.2.3	Condução de calor através da envolvente .....	25
3.3.2.4	Inércia Térmica .....	26
3.3.2.5	Trocas por renovação do ar .....	27
3.4	Mecanismos de transferência de humidade .....	27
3.4.1	Condensações superficiais .....	27
3.4.2	Condensações internas.....	30
4	Análise dinâmica do comportamento térmico dos edifícios – <i>Energy Plus</i> .....	33
4.1	Introdução.....	33
4.2	Metodologia utilizada no caso em estudo .....	36
4.3	Parâmetros de simulação.....	36
4.3.1	Versão .....	36
4.3.2	Edifício .....	36
4.3.3	Algoritmo de convecção: Interior .....	37
4.3.4	Algoritmo de convecção: Exterior.....	37
4.3.5	Timestep .....	38
4.4	Localização e Clima .....	38
4.4.1	Período de simulação.....	38
4.4.2	Temperatura do solo: Superfície do edifício .....	39
4.5	Horários .....	39
4.5.1	Horários: Limites.....	39
4.5.2	Horários: Compacto.....	40
4.5.2.1	Iluminação .....	40
4.5.2.2	Ventilação .....	41
4.5.2.3	Actividades .....	41
4.5.2.4	Ocupação .....	41
4.5.2.5	Equipamentos.....	41
4.5.2.6	Temperatura .....	42
4.5.2.7	Humidade Relativa .....	42
4.5.2.8	A/C.....	43
4.6	Elementos de construção da envolvente .....	43
4.6.1	Material .....	43
4.6.2	Material de Janela : Vidros .....	44
4.6.3	Material de Janela: Gás.....	44
4.6.4	Material de Janela: Shade.....	45
4.6.5	Construção .....	45



4.7	Zonas Térmicas e Envolvente .....	47
4.7.1	Regras geométricas globais .....	47
4.7.2	Zona.....	48
4.7.3	Superfície do Edifício: Detalhada .....	48
4.7.4	Fenestração: Detalhada .....	49
4.7.5	Propriedades da janela: Controlo de sombreamento.....	50
4.7.6	Propriedades da janela: Caixilho e divisor .....	50
4.7.7	Massa Interna .....	50
4.8	Ganhos internos e renovação do ar .....	51
4.8.1	Pessoas .....	51
4.8.2	Lights .....	52
4.8.3	Equipamentos elétricos .....	53
4.8.4	Infiltração da zona: taxa de circulação do ar .....	54
4.9	Controlo de AVAC e termóstatos .....	54
4.9.1	Controlo da zona: Humidade.....	54
4.9.2	Termostato: <i>setpoint</i> duplo .....	55
4.9.3	Controlo da zona: Termostato .....	55
4.10	Unidades de ar impostas no AVAC.....	56
4.11	Conexões do equipamento de AVAC.....	56
4.11.1	Zona HVAC: Lista de equipamentos .....	56
4.11.2	Zona HVAC: Conexões .....	57
4.12	Relatórios de simulação .....	57
5	Caracterização Experimental .....	59
5.1	Considerações iniciais.....	59
5.2	Materiais da argamassa .....	59
5.2.1	Areias.....	60
5.2.2	Pellets de madeira .....	61
5.2.3	Aditivos .....	62
5.2.4	Água .....	62
5.3	Caracterização dos materiais constituintes das argamassas .....	62
5.3.1	Análise Granulométrica dos agregados .....	62
5.3.2	Baridade .....	65
5.4	Preparação das argamassas e provetes.....	65
5.4.1	Dosagem .....	66
5.4.1.1	Mistura .....	66
5.4.1.2	Moldagem e cura dos provetes .....	67
5.5	Plano de Ensaios.....	68
5.6	Caracterização das argamassas no estado fresco .....	69
5.6.1	Consistência por espalhamento .....	69
5.7	Caracterização das argamassas no estado endurecido .....	70

5.7.1	Massa Volúmica Geométrica .....	70
5.7.2	Ensaio de Condutibilidade Térmica.....	70
5.7.3	Ensaio de absorção de água por capilaridade .....	71
5.7.4	Secagem .....	73
5.7.5	Porosidade aberta .....	74
6	Apresentação e discussão dos resultados experimentais .....	77
6.1	Considerações iniciais.....	77
6.2	Constituintes das argamassas .....	77
6.2.1	Análise granulométrica dos agregados .....	77
6.2.2	Baridade .....	79
6.3	Argamassa no estado fresco.....	79
6.3.1	Consistência por espalhamento .....	79
6.4	Argamassa no estado endurecido.....	81
6.4.1	Massa Volúmica Geométrica .....	81
6.4.2	Ensaio de condutibilidade térmica.....	81
6.4.3	Absorção de água por capilaridade.....	83
6.4.4	Secagem .....	85
6.4.5	Porosidade aberta .....	86
6.5	Correlações entre as diferentes propriedades .....	87
6.5.1	Porosidade aberta/massa volúmica .....	87
6.5.2	Massa volúmica/condutibilidade térmica.....	88
6.5.3	Absorção de água por capilaridade/Porosidade aberta .....	89
6.5.4	Secagem/Porosidade aberta .....	89
6.6	Síntese do capítulo .....	90
7	Apresentação e discussão dos resultados de simulação numérica – <i>EnergyPlus</i> .....	91
7.1	Introdução.....	91
7.2	Perdas Térmicas .....	91
7.2.1	Cenário Inicial – Solução Base .....	91
7.2.2	Soluções de melhoria com 4% de Pellets .....	92
7.2.3	Soluções de melhoria com 9% de Pellets .....	94
7.2.4	Soluções de melhoria com 15 % de pellets .....	95
7.2.5	Soluções de melhoria com 23 % de Pellets .....	96
7.2.6	Soluções de melhoria composta: Pellets 23 % + Pellets 4 % .....	97
7.2.7	Soluções de melhoria com 23% de Pellets: Cobertura .....	98
7.2.8	Soluções de melhoria com 23 % de Pellets: Zona corrente, pontes térmicas e cobertura .....	99
7.3	Necessidades energéticas .....	100
7.3.1	Necessidades de aquecimento – Soluções de melhorias com 4 cm de espessura .....	101
7.3.2	Necessidades de arrefecimento – Soluções de melhoria com 4 cm de espessura .....	102

7.3.3	Necessidades de aquecimento – Melhorias com 6 cm de espessura .....	102
7.3.4	Necessidades energéticas de arrefecimento – soluções de melhoria com 6 cm de espessura .....	103
7.3.5	Necessidades energéticas de aquecimento – soluções de melhoria com 8 cm de espessura .....	104
7.3.6	Necessidades energéticas de arrefecimento – soluções de melhoria com 8 cm de espessura .....	104
7.4	Condensações internas e superficiais.....	105
7.4.1	Condensações Superficiais .....	106
7.4.2	Condensações internas.....	106
7.5	Análise económica .....	109
7.5.1	Introdução.....	109
7.5.2	Custo de exploração.....	109
7.5.3	Custos globais .....	112
8	Discussão e Conclusões .....	115
8.1	Conclusões.....	115
8.1.1	Campanha Experimental .....	115
8.1.2	Análise numérica .....	116
8.1.3	Apreciação Geral.....	117
8.2	Desenvolvimentos futuros .....	117
9	Bibliografia .....	119



## Índice de Figuras

Figura 2.1 - Produção dos pellets de madeira .....	12
Figura 2.2 – Matriz perfuradora com navalhas .....	13
Figura 3.1 - Lei Zero da Termodinâmica.....	19
Figura 3.2 - 2º Lei da Termodinâmica .....	20
Figura 3.3 – Balanço energético .....	24
Figura 3.4 - Diagrama Psicométrico .....	29
Figura 3.5 - Mecanismos de difusão numa parede homogénea.....	32
Figura 4.1 - Módulos internos Energy Plus .....	33
Figura 4.2 - IDF Editor.....	34
Figura 4.3 - EP-Launch .....	35
Figura 4.4 - Modelo utilizado .....	36
Figura 4.5 - Parâmetro "Building" .....	37
Figura 4.6 – Período de simulação .....	38
Figura 4.7 – Temperaturas do solo .....	39
Figura 4.8 – Horários : Limites .....	40
Figura 4.9 – Horários: Compacto.....	40
Figura 4.10 - Materiais .....	43
Figura 4.11 - Vidros .....	44
Figura 4.12 – Window material: gas .....	45
Figura 4.13 – Sombreamento das janelas .....	45
Figura 4.14 - Construção.....	47
Figura 4.15 - Zone .....	48
Figura 4.16 - Modelo realizado através do Energy Plus.....	48
Figura 4.17 – Superfícies do Edifício detalhadas .....	49
Figura 4.18 - Vãos envidraçados .....	50
Figura 4.19 – Massa Interna .....	51
Figura 4.20 - Pessoas .....	52
Figura 4.21 - Luzes.....	53
Figura 4.22 – Equipamentos elétricos .....	53
Figura 4.23 – Taxa de circulação do ar .....	54
Figura 4.24 – Controlo de humidade .....	55
Figura 4.25 – Termostato setpoints.....	55
Figura 4.26 - Controlo Temperatura .....	55
Figura 4.27 - Equipamento fictício .....	56
Figura 4.28 – Lista de equipamentos .....	56
Figura 4.29 – Conexões dos equipamentos .....	57

Figura 5.1 - Cal Hidráulica HL5 .....	60
Figura 5.2 - Areia APAS 20.....	60
Figura 5.3 - Pellets de madeira antes da moagem .....	61
Figura 5.4 - Processo de moagem dos pellets de madeira .....	62
Figura 5.5 - Superplastificante Chryso Fluid Premia 180 .....	62
Figura 5.6 - Peneiros série principal e série secundária.....	63
Figura 5.7 - Processo de peneiração mecânica .....	64
Figura 5.8 - Areias após peneiração mecânica.....	64
Figura 5.9 - Cuba e misturadora .....	67
Figura 5.10 - Compactador mecânico .....	68
Figura 5.11 – Mesa de espalhamento, molde e varão .....	69
Figura 5.12 - ISOMET Model 2014 .....	70
Figura 5.13 - Ensaio de condutibilidade térmica .....	71
Figura 5.14 - Provetes prismáticos após impermeabilização das paredes .....	71
Figura 5.15 - Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	72
Figura 5.16 - Ensaio de secagem .....	73
Figura 5.17 - Provetes preparados para o ensaio de porosidade aberta .....	74
Figura 5.18 – Exsicador contendo os provetes .....	74
Figura 5.19 - Pesagem Hidrostática (Ensaio de porosidade aberta) .....	75
Figura 6.1 - Curvas granulométricas (Areias) .....	77
Figura 6.2 - Curva granulométrica dos Pellets de madeira .....	78
Figura 6.3 - Curvas granulométricas das areias, mistura de areias, pellets e mistura com pellets .....	78
Figura 6.4 - Resultados do ensaio de consistência por espalhamento.....	80
Figura 6.5 - Massa volúmica geométrica .....	81
Figura 6.6 - Resultados do ensaio de condutibilidade térmica .....	81
Figura 6.7 - Curvas de capilaridade .....	83
Figura 6.8 - Pormenor das curvas de capilaridade nos primeiros instantes .....	83
Figura 6.9 - Coeficientes de capilaridade.....	84
Figura 6.10 - Valores assintóticos.....	84
Figura 6.11 - Curvas de secagem.....	85
Figura 6.12 - Valores taxa de secagem .....	86
Figura 6.13 - Curva de evaporação de água .....	85
Figura 6.14 - Índice de secagem .....	86
Figura 6.15 - Resultados do ensaio de porosidade aberta .....	87
Figura 6.16 - Correlação entre a massa volúmica e porosidade aberta .....	88
Figura 6.17 - Correlação entre massa volúmica e condutibilidade térmica .....	88
Figura 6.18 - Correlação entre absorção de água por capilaridade e porosidade aberta.....	89

Figura 6.19 - Correlação entre o índice de secagem e a porosidade aberta .....	89
Figura 7.1 -Perdas térmicas por área - Envolvente Opaca.....	91
Figura 7.2 - Perdas térmicas por área: Solução Base - Envolvente Opaca + Vãos Envidraçados.....	92
Figura 7.3 - Perdas térmicas - Melhorias 4 % pellets .....	93
Figura 7.4 - Perdas térmica - Melhorias 9 % de pellets.....	94
Figura 7.5 - Perdas térmicas por área – Melhoria 15 % pellets.....	96
Figura 7.6 - Perdas térmicas por área - Melhoria 23% pellets .....	97
Figura 7.7 - Perdas térmicas - Melhorias compostas.....	98
Figura 7.8 - Perdas térmicas. Melhoria 23 % pellets: Cobertura .....	99
Figura 7.9 - Perdas térmicas: Melhorias 23 % pellets - ZC + PTP + Cobertura .....	100
Figura 7.10 - Necessidades energéticas de aquecimento - Espessuras a 4 cm.....	101
Figura 7.11 - Necessidades energéticas de arrefecimento - Espessuras a 4 cm.....	102
Figura 7.12 - Necessidades energéticas de aquecimento - Espessuras a 6 cm.....	102
Figura 7.13 - Necessidades energéticas de arrefecimento - Espessuras a 6 cm.....	103
Figura 7.14 - Necessidades energéticas de aquecimento - Espessuras a 8 cm.....	104
Figura 7.15 - Necessidades energéticas de arrefecimento - Espessuras a 8 cm.....	105
Figura 7.16 - Condensações Internas - ZC: Espessura 4 cm .....	107
Figura 7.17 - Condensações Internas - PTP: Espessura 4 cm .....	107
Figura 7.18 - Condensações Internas - ZC: Espessura 6 cm .....	108
Figura 7.19 - Condensações Internas - PTP: Espessura 6 cm .....	108
Figura 7.20 - Condensações Internas - ZC: Espessura 8 cm .....	108
Figura 7.21 - Condensações Internas - PTP: Espessura 8 cm .....	109
Figura 7.22 - Custo de exploração - Espessura 4 cm .....	110
Figura 7.23 - Custo de exploração - Espessura 6 cm .....	111
Figura 7.24 - Custo de exploração - Espessura 8 cm .....	111
Figura 7.25 - Custos Globais - Espessura 4 cm.....	113
Figura 7.26 - Custos Globais - Espessura 6 cm.....	113
Figura 7.27 - Custos Globais - Espessura 8 cm.....	114
Figura 7.28 - Retorno financeiro .....	114





## Índice de Quadros

Quadro 2.1 – Classificação agregados .....	6
Quadro 2.2 - Adjuvantes correntes em argamassas.....	9
Quadro 2.3 - Características dos pellets de madeira .....	11
Quadro 2.4 - Estudos realizados acerca de argamassas com incorporação de resíduos .....	16
Quadro 2.5 - Estudos realizados acerca de argamassas com incorporação de resíduos (continuação) .....	17
Quadro 3.1 - Fatores que influenciam a sensação de conforto .....	23
Quadro 3.2 - Resistências térmicas superficiais convencionais .....	30
Quadro 4.1 - Equipamentos elétricos utilizados.....	41
Quadro 4.2 – Consumo diário dos equipamentos elétricos .....	42
Quadro 4.3 - Consumo diário dos equipamentos elétricos .....	42
Quadro 4.4 - Solução base – Envolvente Exterior – Zona Corrente.....	46
Quadro 4.5 - Solução base – Envolvente Exterior – Ponte Térmica Plana .....	46
Quadro 4.6 - Solução base - Laje Intermédia .....	46
Quadro 4.7 - Solução base - Paredes Interiores.....	46
Quadro 4.8 - Solução base - Cobertura Plana.....	46
Quadro 4.9 - Solução base - Pavimento .....	46
Quadro 4.10 - Variáveis utilizadas nas simulações .....	57
Quadro 5.1 - Peneiros utilizados .....	63
Quadro 6.1 - Módulos de finura dos agregados.....	78
Quadro 6.2- Ensaio de Baridade.....	79
Quadro 6.3 – Ensaio de consistência por espalhamento .....	79
Quadro 6.4 - Relações água/ligante finais .....	80
Quadro 6.5 - Quadro síntese.....	90
Quadro 7.1 - Perdas Térmicas pela Envolvente Opaca .....	91
Quadro 7.2 - Perdas térmicas: Solução base - Envolvente Opaca + Vãos Envidraçados .....	92
Quadro 7.3 - Perdas térmicas – Melhorias 4 % Pellets - Envolvente Opaca .....	93
Quadro 7.4 - Perdas térmicas – Melhorias 9 % Pellets .....	94
Quadro 7.5 - Perdas térmicas - Melhorias 15 % pellets .....	95
Quadro 7.6 – Perdas Térmicas – Melhorias 23 % pellets.....	96
Quadro 7.7 - Perdas térmicas - Melhoria composta .....	97
Quadro 7.8 - Perdas térmicas - Melhoria pellets 23%: Cobertura .....	98
Quadro 7.9 - Perdas térmicas - Melhorias 23 % pellets: ZC+ PTP + Cobertura .....	99
Quadro 7.10 - Condições de humidade e temperatura assumidas .....	105
Quadro 7.11 - Condensações Superficiais - Solução Base .....	106



## Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

### Argamassas

P<sub>0</sub> – Argamassa de cal hidráulica, de referência;

P<sub>4</sub> – Argamassa de cal hidráulica com substituição de 4% de areia por pellets de madeira;

P<sub>9</sub> – Argamassa de cal hidráulica com substituição de 9% de areia por pellets de madeira;

P<sub>15</sub> – Argamassa de cal hidráulica com substituição de 15% de areia por pellets de madeira;

P<sub>23</sub> – Argamassa de cal hidráulica com substituição de 23% de areia por pellets de madeira.

### Propriedades e parâmetros

$\lambda$  – Condutibilidade térmica [W/(m.°C)];

A – Área (m<sup>2</sup>);

A/L – Relação água/ligante;

B<sub>a</sub> – Baridade (Kg/m<sup>3</sup>);

CC – Coeficiente de absorção de água por capilaridade [Kg/(m<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup>)];

IS – Índice de secagem;

TS – Taxa de secagem [Kg/(m<sup>2</sup>.h)];

U – Coeficiente de transmissão térmica [W/(m<sup>2</sup>.°C)];

VA – Valor assintótico (Kg/m<sup>2</sup>).

### Materiais

EPS – Poliestireno expandido;

PCM – *Phase Change Materials* (materiais de mudança de fase);

PVC - Policloreto de polivinila.

### Outros

ABIPEL – Associação Brasileira das Indústrias de Pellets;

CEN – *European Committen for Standardization*;

DOE – Departamento de Energia dos Estados Unidos da América;

EPDB – *Energy Performance in Buildings Directive*;

INETI – Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação;

IPQ – Instituto Português da Qualidade;

IWEC – *Internacional Weather for Energy Calculations*;

PTP – Ponte térmica plana;

REH – Regulamento dos Edifícios de Habitação;  
ZC – Zona Corrente.

# **1 Introdução**

## **1.1 Motivação e enquadramento do tema**

Existe hoje em dia, cada vez mais, a noção de sustentabilidade, a consciencialização que os recursos naturais não são eternos, sendo necessária a sua manutenção para as gerações futuras. Tornar os processos sustentáveis nos diferentes setores produtivos constitui uma estratégia necessária para assegurar que os recursos naturais subsistem no futuro.

A construção civil tem um impacto bastante negativo no nosso planeta. O consumo de recursos naturais, modificações de paisagem e produção de resíduos, são os principais fatores que contribuem para a “degradação” do meio ambiente. É estimado ainda, que o setor da construção seja responsável pelo consumo de cerca de 50 % de todos os recursos naturais disponíveis, renováveis e não renováveis.

Os resíduos são produtos muitas vezes descartados, gerados pelas atividades humanas, sendo predominantemente gerados através da indústria. Nos últimos anos, devido ao grande crescimento populacional, desenvolvimento da indústria e melhoria da qualidade de vida, a quantidade de resíduos produzidos sofreu um grande aumento havendo, uma necessidade de reaproveitamento desses resíduos. A reutilização e reciclagem de resíduos traz inúmeros benefícios económicos e ambientais, permitindo uma minimização da extração de recursos naturais e uma redução dos níveis de poluição atmosférica elevados, derivados da extração, processamento e transporte destes resíduos.

No últimos anos, os requisitos energéticos para edifícios (REH e diretiva europeia EPBD “Energy Performance in Buildings Directive”) apontam no sentido de tornar os edifícios cada vez mais eficientes. Com efeito, existe, além das preocupações relacionadas com a sustentabilidade da construção, uma crescente preocupação em desenvolver soluções de revestimento que contribuam para a melhoria do desempenho térmico das fachadas e o consequente cumprimento das exigências regulamentares.

Aliando estes dois fatores, foram idealizadas soluções que passam por conceber revestimentos utilizando resíduos em substituição do agregado corrente, ou seja, a areia. Deste modo, utilizando resíduos adequados, é possível produzir argamassas mais eficientes a nível energético, sendo ao mesmo tempo, argamassas sustentáveis.

A presente dissertação pretende analisar a influência de argamassas de reboco incorporando pellets de madeira no desempenho energético de um edifício de habitação recorrendo a um modelo numérico e a ensaios experimentais.

## **1.2 Objetivos**

Os objetivos da presente dissertação visam avaliar o comportamento de argamassas de cal hidráulica com pellets de madeira no desempenho energético de um edifício residencial, através de um modelo numérico e de ensaios experimentais.

Para tal, foi necessário definir formulações adequadas de modo a serem constituídas argamassas apropriadas para serem aplicadas como revestimentos exteriores. Seguidamente foi definido um plano de trabalhos, contendo os ensaios necessários a efetuar para avaliação das características físicas das argamassas, os materiais necessários para a produção das argamassas e os equipamentos a utilizar durante todo o processo.

Realizou-se a caracterização granulométrica dos agregados (pellets de madeira e areias) de modo a encontrar as proporções adequadas para a substituições pretendidas. Após terem sido definidas as quantidades adequadas, utilizando um traço corrente para argamassas de

revestimento (1:3), foi realizada uma campanha preliminar, de modo a encontrar a relação água/ligante adequada para este tipo de argamassas. Após isso deu-se início à campanha de ensaios experimentais realizando uma mistura de referência, e utilizando as percentagens de substituição de 4%, 9%, 15% e 23 %.

Numa segunda fase, com os resultados obtidos provenientes da campanha experimental, deu-se início à modelação numérica, através do software *EnergyPlus*. Nesta modelação foi simulada a aplicação das várias argamassas estudadas como revestimentos de fachada, e também a sua utilização como camada de forma nas coberturas, de modo a avaliar o seu desempenho energético.

### **1.3 Estrutura**

A presente dissertação é constituída por 8 capítulos.

No capítulo 1, denominado *Introdução*, é abordado o enquadramento geral do tema, os objetivos da dissertação realizada e apresentada a sua estrutura.

No capítulo 2, *Estado do Conhecimento*, são caracterizadas as argamassas de revestimento, e é realizada uma revisão bibliográfica acerca de argamassas com incorporação de resíduos. São descritos também os pellets de madeira, a sua produção e as vantagens que podem advir da sua utilização em argamassas de revestimento.

No capítulo 3, *Caracterização do comportamento higrotérmico dos edifícios*, são os descritos os fenómenos mais comuns de transmissão de calor que acontecem num edifício, e caracterizada a equação de balanço térmico. Também neste capítulo são enunciados os fatores que contribuem para o conforto térmico dentro dos edifícios.

No capítulo 4, *Análise dinâmica do comportamento térmico dos edifícios – EnergyPlus*, é caracterizada a modelação energética realizada e os dados utilizados nas simulações realizadas.

No capítulo 5, *Caraterização Experimental*, são descritos os todos os procedimentos experimentais realizados, nomeadamente a caracterização dos materiais, a produção das argamassas e os ensaios realizados tanto no estado fresco como no estado endurecido.

No capítulo 6, *Apresentação e discussão dos resultados experimentais*, são enunciados os resultados da campanha experimental e realizada uma análise crítica aos seus valores.

No capítulo 7, *Apresentação e discussão dos resultados da simulação numérica – EnergyPlus*, são enunciados os resultados referentes à simulação numérica realizada e uma análise crítica aos valores obtidos.

No capítulo 8, *Considerações finais*, é realizado um comentário final acerca dos objetivos da dissertação e são propostas ideias de desenvolvimento aplicadas em trabalhos futuros.

Finalmente é apresentada a bibliografia consultada, e em seguida são apresentados os anexos.

## **2 Estado do Conhecimento**

### **2.1 Introdução**

Neste capítulo foi realizada uma análise quanto ao estado do conhecimento do tema abordado. Para isso foi efetuada uma pesquisa extensa, de modo a consolidar toda a informação acerca da temática das argamassas, a sua constituição e características. Primeiramente irá ser feita uma descrição acerca da evolução histórica das argamassas ao longo dos tempos, de modo a serem conhecidas as suas origens, as suas características e a forma de como as suas limitações foram ultrapassadas. Serão analisados os resíduos utilizados neste trabalho, os pellets de madeira, abordando a sua produção e características principais. Por fim, será realizada uma análise das argamassas com incorporação de resíduos e das suas características, bem como dos principais resíduos utilizados na sua génese.

### **2.2 Argamassas**

#### **2.2.1 Enquadramento histórico**

Ao longo dos tempos, houve sempre necessidade de o ser humano construir abrigos, tanto para proteção como, contra os fatores exteriores (frio, vento, chuva, etc..), como dos animais selvagens e para proteção contra outros homens. De modo a obterem melhor estabilidade nas construções dos seus abrigos, os primeiros homens utilizaram pequenas camadas de argila, inicialmente seca e posteriormente molhada (lama), de forma a reduzirem ou eliminarem as fendas entre as diversas peças utilizadas, criando assim as primeiras argamassas (Mesquita, 2010).

Depois disso, as grandes civilizações já usavam nas suas construções, argamassas de modo a melhorar as condições de estabilidade das mesmas. A produção de cal era familiar à maior parte dos povos da antiguidade, chineses, egípcios, fenícios, gregos, etc.. Estes povos produziam a cal gorda, utilizando-a como ligante na execução das alvenarias ou na elaboração de rebocos pintados com cores naturais ou destinados à pintura de frescos (Alvarez et al., 2005).

No império romano foram desenvolvidas argamassas de cal aérea com a introdução de adições e adjuvantes, nomeadamente, cinzas vulcânicas (pozolanas), pó e agregados de tijolo ou telha, e matérias orgânicas. Estas adições serviam essencialmente para controlar o tempo de presa, conferir hidráulidade e aumentar a durabilidade das construções. Isto foi considerado uma inovação e permitiu aumentar a qualidade das construções realizadas (Paz Branco, 1994; Melo, 2014).

A necessidade de realizar construções em zonas marítimas e fluviais, levou a uma procura de aglomerantes com capacidade de endurecerem debaixo de água. A investigação deste fenómeno foi desenvolvida pelo engenheiro inglês John Smeaton, em 1756, o que levou mais tarde à produção de cais hidráulicos. Em 1824, John Aspdin patenteia o cimento *Portland*, criando as primeiras fábricas de cimento em Inglaterra (Mesquita, 2010).

Os mercados destas duas argamassas iriam confrontar-se nos anos seguintes, o que resultou numa vantagem para os fabricantes do cimento Portland, devido às melhores características desse produto. A indústria cimenteira instalou-se em Portugal no princípio do século XIX, o que levou a utilização do cimento Portland como ligante das argamassas para rebocos e acabamentos. Assim, durante largos anos, e até à atualidade passou a ser corrente a produção de rebocos com apenas um ligante hidráulico, sendo este o cimento Portland (Alvarez et al., 2005). Este ligante proporciona maior resistência mecânica, maior aderência e presa mais rápida. No entanto, o uso excessivo de argamassas só à base de cimento criou problemas associados à excessiva retração, reduzia permeabilidade ao vapor de água, pouca

deformabilidade e consequente fissuração nos rebocos. Importa ainda referir que se tem assistido ao retorno da cal na composição das argamassas de revestimento, devido, por um lado, à melhor compreensão dos problemas resultantes da utilização exclusiva do cimento e, por outro, à necessidade de executar obras de reabilitação e conservação em edifícios antigos onde as argamassas de cimento têm originado resultados insatisfatórios.

## **2.2.2 Classificação das argamassas**

### **2.2.2.1 Argamassas industriais**

A evolução da indústria de construção provocou também um aumento e uma mudança em relação às exigências a que esta estava sujeita. A necessidade do cumprimento dos prazos, de aumentar a qualidade e durabilidade do trabalho acabado, a necessidade do aumento da rapidez de execução, e a necessidade de redução de desperdícios, iria levar a que o sistema tradicional de produção de argamassas fosse alterado. Devido a isto, na década de 50 a 60 do século XX, foi iniciada a produção de argamassas prontas, ou seja, de argamassas industriais (Costa, 2008).

Ao contrário das argamassas tradicionais, nas argamassas industriais, o doseamento e mistura das várias matérias-primas é realizado, de forma controlada, numa fábrica. A argamassa é entregue em obra no estado “seco”, necessitando apenas de ser misturada com água, de acordo com as instruções do fabricante, para estar completa, ou então, em certos casos é entregue em pasta pronta a aplicar (caso das argamassas estabilizadas).

Estas argamassas apresentam inúmeras vantagens quando comparadas com as argamassas tradicionais (feitas em obra), devido a permitirem uma maior garantia de qualidade com menor probabilidade de ocorrência de erros humanos na sua produção, garantindo assim homogeneidade nas argamassas produzidas (do mesmo tipo).

A necessidade de produzir materiais de construção específicos para um determinado fim, também constitui uma vantagem destas argamassas. Estes produtos devem ser rigorosamente preparados e as suas prestações devem ser rigorosamente conhecidas e controladas, o que implica quantidades muito específicas de aditivos e adjuvantes. Para argamassas tradicionais preparadas em obra, a precisão necessária é praticamente impossível, sendo que apenas é possível em argamassas preparadas industrialmente.

### **2.2.2.2 Argamassas industriais semi-acabadas**

As argamassas industriais semi-acabadas são argamassas pré-preparadas em fábrica, mas que necessitam de ser modificadas em obra. Este tipo de argamassas ainda se divide em argamassas pré-doseadas e argamassas pré-misturadas.

As argamassas pré-doseadas têm os seus componentes doseados em fábrica, e estes são fornecidos em obra, onde são misturados, segundo as instruções e condições do fabricante. Este tipo de argamassas é classificado segundo as suas propriedades e utilização, podendo ser de diferentes grupos, conforme apresentado em seguida (Pedro, 2011) :

- Argamassa de uso geral (GP) – argamassas cujas características satisfazem os requisitos gerais, sem características especiais. Neste grupo incluem-se as argamassas minerais de reboco;
- Argamassa de reboco leve (LW) – argamassa com massa volúmica seca inferior a um determinado parâmetro;
- Argamassa colorida (CR) – argamassa com a incorporação de pigmentos, para realizar funções decorativas;
- Monocamada (OC) – argamassa cuja aplicação é feita apenas numa camada;



- Argamassa de renovação (R) – argamassa com grande porosidade, mas com baixa capilaridade, de modo a ser usada em paredes de alvenaria húmidas e impregnadas de sais solúveis.
- Argamassas de isolamento térmico (T) – argamassas com propriedades de isolamento térmico.

As argamassas pré-misturadas são aquelas em que os seus componentes são doseados e misturados em fábrica, fornecidos em obra, onde serão adicionados outros componentes, segundo as especificações do fabricante, ou este também os fornece.

### **2.2.2.3 Argamassas tradicionais**

As argamassas tradicionais ou argamassas feitas em obra, são compostas pelos constituintes tradicionais (normalmente, ligante/s, agregados e água), sendo doseados e misturados em obra.

## **2.2.3 Argamassas de construção**

### **2.2.3.1 Tipos de Argamassas de construção**

Existem vários tipos de argamassas de construção, sendo que estas podem ser designadas de acordo com a sua aplicação, conforme apresentado em seguida (Mesquita,2010):

- Argamassa de Assentamento – utilizadas para a construção de muros e paredes. Possuem boa resistência mecânica e aderência ao suporte, assim como uma boa capacidade de absorver movimentos derivados de tensões mecânicas, gradientes térmicos e humidade;
- Argamassa de revestimento – utilizadas para revestimento de paredes e muros, com possibilidade de possuírem vários acabamentos ou pintura. Estes tipos de argamassas podem ser tradicionais ou então monocamada;
- Argamassas para juntas – utilizadas para o preenchimento de juntas entre os elementos dos revestimentos. Estas podem ter funções estéticas ou funcionais;
- Argamassas de regularização de pavimentos – utilizadas na regularização e nivelamento de pavimentos. Estas argamassas possuem como característica fundamental, uma elevada resistência à compressão.

O presente trabalho incide nas argamassas de revestimentos de paredes, também designadas por rebocos, sendo estas apresentadas em seguida.

### **2.2.3.2 Argamassas de revestimento**

As argamassas de revestimento constituem a primeira linha de defesa do edifício face ao meio exterior, e por isso detêm uma importância acrescida. Ao longo do tempo a permanente exposição dos edifícios às agressões atmosféricas provoca um extenso desgaste e deterioração nos revestimentos, o que pode vir a comprometer a durabilidade do edifício (Madeira, 2013).

Sendo assim, um revestimento para paredes exteriores têm como exigências funcionais, a proteção contra agentes agressivos, planeza, verticalidade e regularidade, fácil limpeza e manutenção e garantir uma contribuição significativa para a estanquidade global da parede à água.

De modo a garantir as exigências funcionais, as argamassas de revestimentos exteriores, devem possuir determinadas características, de modo a desempenharem adequadamente as funções designadas. Dentro dessas propriedades destacam-se a trabalhabilidade, resistência à fendilhação, capacidade de impermeabilização em zona não fendilhada, permeabilidade ao

vapor de água, aderência ao suporte, resistência aos choques, compatibilidade com o suporte, aspecto estético e durabilidade (Veiga, 1998).

Os revestimentos exteriores à base de argamassas são os revestimentos mais comuns a serem utilizados na construção, e portanto as suas características são mais rigorosas e exigentes, a nível físico, térmico e acústico. Devido a isso, tem sido desenvolvido estudos de modo a introduzir na génese novos materiais com objetivo de melhorar o seu comportamento (Melo, 2014).

## 2.3 Constituintes das argamassas

As argamassas são constituídas por agregados, ligantes e adjuvantes/aditivos, sendo que cada uma destas matérias-primas possui um papel fundamental no funcionamento da argamassa. Os agregados relacionam-se com a estabilidade dimensional e a resistência elevada que proporcionam à argamassa; o ligante tem a função de preencher os vazios existentes entre os agregados, formando uma pasta que ganha presa e endurece e virtude das reações de hidratação; os adjuvantes/aditivos têm o objetivos de alterar alguma característica física, mecânica ou química de modo a melhorar propriedades específicas (Costa, 2008).

De seguida serão abordados os constituintes das argamassas, mais especificamente.

### 2.3.1 Agregados

A produção de argamassas apenas constituídas por pasta de cimento (ligante) como material de construção, não seria viável, porque apesar de possuírem uma resistência mecânica satisfatória, a mistura iria possuir uma grande instabilidade dimensional e como consequência valores elevados de fluência e retração. Ao fatores mencionados junta-se também os elevados custos que uma argamassa deste tipo iria acarretar. Portanto, juntamente com o ligante, são utilizados os agregados na sua produção, utilizando a máxima quantidade destes materiais com granulometrias adequadas, para permitir uma maior compacidade e a minimização do volume de vazios (Coutinho, 2002).

Quadro 2.1 – Classificação agregados

Origem	Dimensão	Massa Volúmica
<b>Naturais</b> - Utilizados com a forma que são encontrados na natureza;	<b>Fino</b> - as areias, naturais ou britadas, com partículas de menores dimensões, usualmente com máxima granulometria inferior a 4 mm;	Conforme a massa volúmica que possuem. Podem ser <b>leves, normais</b> ou <b>pesados</b> . Os mais utilizados são os que possuem massa volúmica normal.
<b>Industrializados</b> - Composição específica obtida por processos industriais;		
<b>Reciclado</b> - Resultante do processo de materias inôrgancis anteriormente utilizados na construção.	<b>Grosso</b> - rolado ou britado ( sendo que as argamassas não incluem agregados grossos).	

Os agregados podem classificar-se segundo a sua origem, dimensão e massa volúmica como indicado no quadro 2.1 (Márcio, 2012 ; Melo, 2014) .

Os agregados utilizados nas argamassas são, na sua maioria, areias, sendo as mais correntes, as areias siliciosas. No entanto também são utilizadas areias de outras constituições mineralógicas (calcárias, graníticas, basálticas) e ainda areias resultantes de subprodutos de exploração e preparação das rochas. No caso das areias siliciosas, estas podem ser lavadas ou não, em caso negativo apresentam teor em argila, que em excesso origina uma maior propensão para apresentarem retração (Faria, 2010).

A forma e graduação dos agregados têm uma influência essencial nas propriedades das argamassas. Se a distribuição granulométrica do agregado for alargada, produz uma argamassa com menor porosidade, maior resistência mecânica, maior capacidade de retenção de água e consequentemente uma melhor trabalhabilidade, devido aos espaços entre as partículas serem preenchidos com partículas mais pequenas (Costa, 2008).

### **2.3.2 Ligantes inorgânicos**

Os ligantes são substâncias com capacidade de aglutinar partículas, potenciando uma ligação entre as partículas constituintes de argamassa e garantindo a sua aderência ao suporte. Estes são materiais finamente moídos que, em contacto com certos elementos, ganham presa e endurecem, o que promove a reunião dos grãos.

Os ligantes utilizados para as argamassas de construção são essencialmente de natureza inorgânica: ligantes aéreos (cal aérea e gesso) e ligantes hidráulicos (cal hidráulica e cimento). Nas argamassas de construção é possível a utilização combinada de ligantes, sendo apenas necessário garantir que as suas propriedades sejam compatíveis. As combinações mais utilizadas são cal aérea e gesso, e cal aérea e cimento, sendo este tipo de argamassas denominadas bastardas (Costa, 2008). Em seguida descrevem-se os principais tipos de ligantes utilizados em argamassas de revestimento tradicionais e não tradicionais.

#### **2.3.2.1 Cimento**

O cimento pertence à categoria dos ligantes hidráulicos, formando uma pasta que desenvolve presa e endurece quando entra em contacto com água, devido a reações e processos de hidratação. Após o endurecimento, este ligante conserva a sua resistência mecânica, mesmo estando submerso.

O cimento constitui ainda o ligante mais utilizado na produção de argamassas, visto que possui melhores resistências mecânicas, menor sensibilidade às condições ambientais e menor tempo de presa, quando comparado com a cal hidráulica (Leal, 2012).

O cimento mais corrente é o Portland, produzido a partir de duas matérias-primas fundamentais: calcário, formado por carbonato de cálcio,  $\text{CaCO}_3$ ; e por argila, constituída essencialmente por silicatos hidratados de alumínio e de ferro, resultantes da decomposição de feldspatos. A sua matéria-prima é obtida a partir de uma mistura de calcário e margas (rochas calcárias contendo argila) e a relação, em massa, entre a quantidade de argila e de calcário de, aproximadamente, 1 para 4.

O processo de fabrico do cimento Portland assenta em três fases essenciais, extração e preparação da matéria-prima, cozedura e moagem.

Na primeira fase ocorre o desmonte da rocha, com recurso a explosivos, sendo depois o material desmontado em blocos, com dimensões de 1 a 2 metros, transportados em seguida para um britador. À saída do britador o material torna-se relativamente fino com a maior dimensão de 0,05 a 0,10 metros. O material é seguidamente transportado para silos de homogeneização, onde é realizada uma análise química automática, de modo a calcular as correções necessárias da composição do material, e caso necessário são adicionadas essas correções.

Na segunda fase, a matéria é introduzida no forno rotativo onde é sujeita a um tratamento térmico que a transforma, num produto intermédio, o clínquer, obtido a uma temperatura situada entre

os 1400-1450 °C. A este processo dá-se o nome de clinquerização. O clínquer é arrefecido rapidamente à saída do forno, para evitar que parte das reações químicas que ocorreram no forno, se invertam.

Na terceira fase, é realizada a moagem do clínquer e a sua mistura com os outros constituintes, nomeadamente o gesso (para regular a presa do cimento) e as adições (Gomes et al.,2013; Cimpör, 2017).

Além do cimento Portland, são produzidos também outros tipos, tais como, o cimento branco e os cimentos pozolânicos. Nos cimentos pozolânicos ocorre a substituição de uma parte do clínquer por pozolanas enquanto os cimentos brancos possibilitam a obtenção de argamassas pigmentadas, através de uma escolha adequada dos agregados e da utilização de pigmentos (Faria, 2010).

A norma portuguesa EN 197-1:2012 (IPQ,2012) é referente ao cimento, onde são classificados os 27 tipos de cimentos correntes e os seus requisitos mecânicos, físicos e químicos, classes de resistência e durabilidade.

### **2.3.2.2 Cais**

As cais dividem-se em cais aéreas e cais hidráulicas, sendo classificadas de acordo com a norma portuguesa NP EN 459-1:2015 (IPQ,2015).

As cais aéreas são cais constituídas por óxido ou hidróxido de cálcio, endurecendo lentamente em contacto com ar devido à reação com o dióxido de carbono. Não fazem presa dentro de água, devido a não possuírem propriedades hidráulicas.

As cais aéreas dividem-se, segundo a quantidade de magnésio que possuem, em cal aérea cálcica, CL, e cal aérea dolomítica, DL. As primeiras possuem apenas óxido ou hidróxido de cálcio e as segundas possuem, para além do cálcio, óxido ou hidróxido de magnésio.

Estas cais são produzidas a partir da rocha calcária pura ou de calcários magnesianos, a uma temperatura máxima de calcinação da rocha de 800 a 900 °C. A rocha ao ser cozida é transformada em óxido de cálcio e produz dióxido de carbono para o ambiente. Ao ser posta em contacto com a água obtém-se o hidróxido de cálcio e em seguida, ao ser posta em contacto com o ambiente, o hidróxido de cálcio carbonata, absorvendo de novo a parcela equivalente ao dióxido de carbono que tinha libertado anteriormente (Faria, 2010).

A cal hidráulica é uma cal que endurece tanto na água quanto no ar e obtém-se também através da calcinação da pedra calcária, à semelhança das cais aéreas, mas contendo 5 % a 20% de argila e com uma cozedura a uma temperatura de 1000 °C.

Segundo a norma NP EN 459-1, as cais hidráulicas dividem-se ainda em cais hidráulicas, HL, e hidráulicas naturais, NHL. A principal diferença entre estes dois ligantes, é a utilização associada de aditivos para a cal hidráulica, sendo também designada de cal hidráulica artificial.

Estas cais apresentam uma massa volúmica mais baixa e menor resistência a compressão do que o cimento, sendo a sua principal aplicação na reabilitação de edifícios antigos. Outras aplicações são de revestimento, de reboco e assentamento de alvenaria, devido a terem melhor trabalhabilidade, proporcionarem um bom acabamento, apresentarem boa aderência e menores variações de volume (Costa,2008).

### **2.3.2.3 Gessos**

Resultam da cozedura da pedra de gesso a temperaturas baixas. Em Portugal é utilizado tradicionalmente em camadas de acabamento de revestimentos interiores de paredes em espessuras finas com agregados muito finos, sendo por vezes, incorporada cal para atuar com retardador de presa. Estes revestimentos possuem um papel de regulador de humidade ambiente e de isolamento face a situações de incêndio, devido às propriedades higroscópicas

que permitem ao gesso captar e libertar, fácil e de uma maneira sucessiva moléculas de água do ar ambiente (Faria, 2010).

### 2.3.3 Água

Apesar de por vezes se dar pouca importância à qualidade da água a utilizar na produção das argamassas, esta constitui um elemento fundamental na constituição da argamassa, promovendo as reações de hidratação e as propriedades aglutinantes do ligante.

A qualidade da água a utilizar na amassadura na produção das argamassas deve ser isenta de quaisquer impurezas (argila, matéria orgânica), bem como não conter substâncias perigosas em quantidades consideráveis, pois esta pode afetar as resistências mecânicas, químicas e a compacidade das argamassas. Deve por isso em termos gerais, ser utilizada água potável de modo a todos os requisitos mínimos exigidos às argamassas sejam respeitados (Costa, 2008; Mesquita, 2010).

O excesso de água reduz a resistência mecânica das argamassas, mas no entanto a carência de água pode provocar o aparecimento de fendas, bem como uma fraca aderência ao suporte, portanto a quantidade de água a utilizar não pode ser arbitrada, mas sim calculada. Devido a isto, a quantidade de água a utilizar é obtida através da relação água/ligante (A/L), de forma cuidada visto ter influência no seu estado fresco, e no seu estado endurecido, nomeadamente na trabalhabilidade, aderência ao suporte, porosidade, absorção de água, retração e secagem (Melo, 2014).

### 2.3.4 Adjuvantes

Os adjuvantes são produtos de natureza mineral ou orgânica, adicionados em quantidades baixas (geralmente em quantidades inferiores a 5% da massa do ligante) à argamassa com a finalidade de modificar algumas das suas propriedades, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

*Quadro 2.2 - Adjuvantes correntes em argamassas*

Adjuvantes	Propriedade
<b>Plastificantes</b>	Aumentam a trabalhabilidade da argamassa, diminuindo a quantidade de água de amassadura.
<b>Superplastificantes</b>	Realizam a mesma propriedade do que os plastificantes, permitindo no entanto maiores reduções de água.
<b>Retentores de água</b>	Melhoram a hidratação da argamassa, provocando uma maior retenção de água por este.
<b>Promotores de aderência</b>	Melhoram a aderência da argamassa, sem aumentar o teor de ligante, provocando a diminuição da retração.
<b>Hidrófugos de massa</b>	Aumentam a capacidade de impermeabilização, impedindo a penetração e circulação de água.
<b>Introdutores de ar</b>	Introduzem bolhas de ar que permitem um aumento na impermeabilização, na resistência ao gelo-degelo e aos sais.
<b>Fungicidas</b>	Impedem a criação de micro-organismos nas argamassas.

No quadro 2.2, apresentam-se os tipos de adjuvantes mais comuns, bem como as propriedades que introduzem nas argamassas.

### **2.3.5 Adições**

As adições são materiais finos, incorporados nas argamassas (ou em betões) de modo a conferir melhorar, modificar ou conferir propriedades à mistura, sendo que a sua quantidade é levada em consideração na composição da argamassa. A utilização de adições em argamassas, é cada vez mais frequente, sendo os materiais utilizados para este efeito as pozolanas (naturais e artificiais) e as fibras (fillers), entre outros.

## **2.4 Pellets de madeira (wood pellets)**

### **2.4.1 Introdução**

Nos dias de hoje os combustíveis fósseis, constituem os recursos dominantes para satisfazer a procura energética a nível mundial. Apesar de terem tido, desde a revolução industrial, um papel fundamental no desenvolvimento tecnológico, social, e económico, estes apresentam várias desvantagens, sendo a mais relevante, o facto de serem recursos limitados e não se encontrarem distribuídos de forma uniforme pelo mundo. De modo a combater a limitações inerentes a utilização destes recursos, ocorreu uma procura de outras fontes energéticas alternativas, tendo sido dado grande ênfase às energias renováveis, sobretudo por serem recursos naturais ilimitados (Marques,2015).

A biomassa é uma fonte de energia renovável que se refere à matéria orgânica não fossilizada e biodegradável que acumulou energia durante o processo de fotossíntese, nas quais a energia proveniente do sol, é acumulada nas ligações químicas entre as suas moléculas. Quando as ligações entre as moléculas de carbono, hidrogénio e o oxigénio são quebradas pela digestão, combustão ou decomposição, estas substâncias libertam a energia química acumulada (Mckendry,2017).

É proveniente das plantas e pode ser transferida para os animais através da cadeia alimentar e está proveniente nos seus desperdícios, os quais podem ser convertidos para o uso diário humano através de processos como combustão, que liberta dióxido de carbono acumulados nas plantas.

Muitos dos combustíveis de biomassa utilizados hoje em dia, aparecem sobre a forma de produtos de madeira, vegetação seca, resíduos provenientes das colheitas e plantas aquáticas. A energia biomassa sempre teve um papel preponderante na energia mundial, e é estimado que constitua de 10 a 14 % do abastecimento energético mundial (Marques, 2015; Mckendry, 2017).

Em Portugal, bem como no resto da Europa, o petróleo constitui a fonte energética mais utilizada ao longo dos anos (apesar de ter havido uma diminuição no seu consumo) e a segunda fonte energética com mais utilização são as energias renováveis. Apesar de ser menos utilizada que as energias hídrica e a eólica, para a produção de energia elétrica, a energia biomassa tem a vantagem de poder ser armazenada e utilizada, quando de facto necessário, o que permite um abastecimento constante (Marques,2015).

Os pellets de madeira são um tipo de combustível biomassa provenientes da indústria de transformação de madeira, nomeadamente resultantes da moagem de estilha de madeira e outros desperdícios. Os pellets de madeira apareceram no final da década de 70 na América do Norte, com o propósito de combater a crise do petróleo, mas no entanto o seu consumo só atingiu valores relevantes na década de 90 (Martinho,2017).

## 2.4.2 Características

Os pellets de madeira são considerados como biocombustível sólido granulado, sendo constituídos por matéria orgânica, proveniente da biomassa florestal e de resíduos da indústria de processamento de madeira, prensada em pequenas formas cilíndricas.

Grande parte da produção dos pellets, em Portugal, é obtida através da serradura do pinheiro, devido a este ser a espécie mais utilizada para serração. Mais recentemente no entanto, foram realizados diversos estudos para possibilitar a incorporação nos pellets, de novos tipos de materiais com elevado poder calorífico, tais como polímero, têxteis, pó de tinta, cartão, entre outros materiais passíveis de combustão, permitindo assim gerar um segundo aproveitamento de resíduos (visto que os próprios pellets já constituem um primeiro aproveitamento) (Barros, 2013).

No quadro 2.3 encontram-se algumas características gerais dos pellets de madeira.

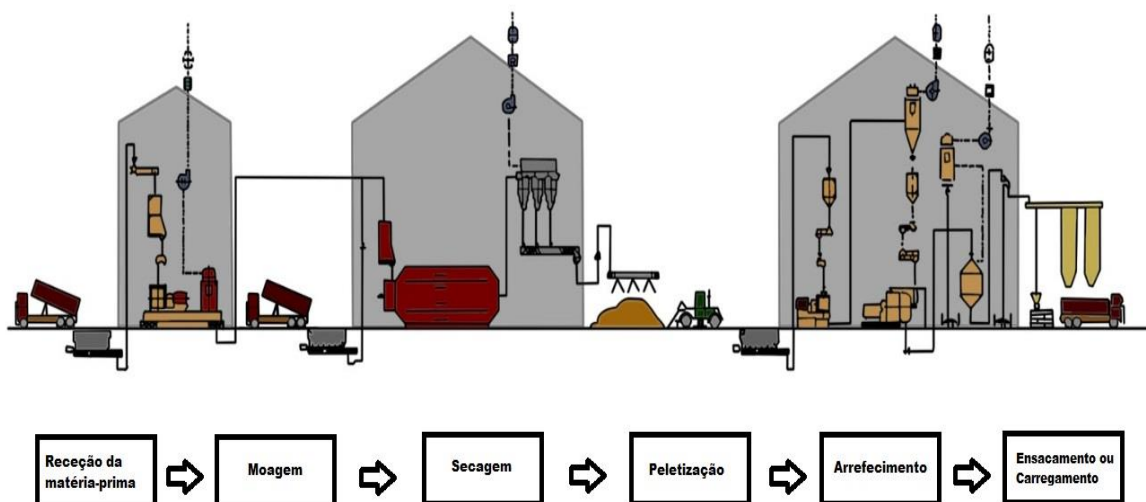
Os pellets de madeira possuem grande facilidade de armazenamento, processamento e transporte, possuindo dimensões reduzidas e normalizadas, o que traz vantagens relativamente a outros combustíveis de biomassa (Rabaçal, 2010). Além disso possuem um custo reduzido comparativamente a outros materiais, além de que, são considerados um produto sustentável, visto que são gerados a partir do aproveitamento de resíduos.

*Quadro 2.3 - Características dos pellets de madeira (Adaptado de Marques,2015; Rabaçal,2010)*

Característica	Unidade	Pellets de madeira
Diâmetro	mm	6-8
Comprimento	mm	3,15 - 40
Massa volúmica	kg/m <sup>3</sup>	≥ 600
Poder calorífico	MJ/kg	16,5 - 19
Teor de humidade	% em massa	≤ 10
Teor de cinza após combustão	% em massa	< 0,7
Emissão líquida de CO <sub>2</sub>	massa	0
Capacidade máxima de produção	ton/h	4-6
Matéria-prima	-	Serradura; desperdícios de madeira e resíduos agrícolas.

## 2.4.3 Fabrico

Até a formação do produto final, os pellets de madeira passam por várias fases de produção, conforme se pode observar na figura 2.1.



*Figura 2.1 - Produção dos pellets de madeira (Adaptado ABIPEL)*

Apesar de poderem existir ligeiras diferenças nas etapas de produção por parte dos vários fabricantes de pellets, o processo de fabrico segue, de um modo geral, as mesmas fases, sendo elas: receção da matéria-prima, moagem, secagem, peletização, arrefecimento e armazenamento/embalamento.

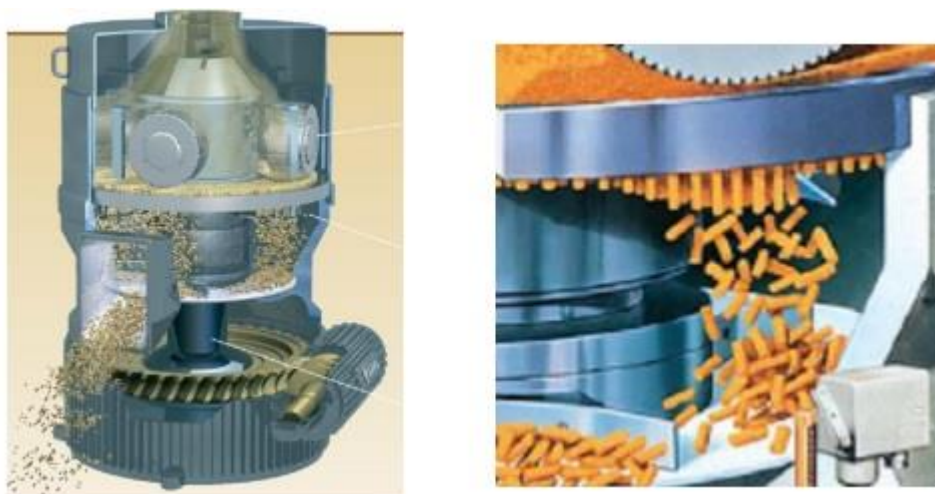
Quando a matéria-prima chega ao local de fabrico, é necessário realizar uma filtragem, que funciona como uma limpeza de impurezas. Isto acontece porque a maior parte do material é proveniente de florestas ou de serrações, e estão propícios de conterem matérias que iriam contaminar os pellets.

De seguida o material sofre um primeiro processo de moagem de forma a reduzir a sua granulometria, sendo seguido de um processo de secagem. A secagem é realizada de forma uniforme, para garantir um baixo teor de humidade (cerca de 8-12 %), antes de o material ser prensado. O material deve possuir um teor de humidade adequado, visto que, se possuir humidade em excesso, a formação de vapor durante a prensagem pode provocar a desintegração dos pellets, e se a humidade for demasiado baixa pode ocorrer a sua carbonização.

Caso a matéria-prima já se encontre na forma de serradura e sem excesso de humidade, é apenas necessário realizar uma moagem fina de forma a uniformizar a granulometria da serradura.

A seguir, a matéria sofre o processo de peletização. A peletização consiste, de forma simplificada, na introdução da matéria-prima numa prensa, funcionando pela ação de rolos, em que o material sai através de uma matriz perfurada com orifícios circulares, que são cortados com as dimensões pretendidas. Na figura 2.2 encontra-se um exemplo do processo de peletização.





*Figura 2.2 – Matriz perfuradora com navalhas (Sá,2009)*

Neste processo os pellets atingem temperaturas bastante elevadas (110-130 °C) e por isso em seguida é necessário realizar o arrefecimento destes materiais. Desta forma, as ligações entre as partículas são fortalecidas, e os pellets endurecem atingindo uma forma rígida.

Após o arrefecimento, os pellets encontram-se prontos para serem armazenados, em silos, ou embalados, devendo o seu armazenamento ser efetuado num local seco, para os pellets manterem a sua durabilidade (Barros, 2013).

#### **2.4.4 Influência da incorporação de pellets de madeira em argamassas**

A incorporação de pellets de madeira, em substituição do agregado, em argamassas irá influenciar as suas propriedades, alterando as características, quer no estado fresco quer no estado endurecido. Apesar de, quando triturados, a sua dimensão se assemelhar a de uma areia, a sua forma, características químicas, físicas e mecânicas são diferentes, e portanto, a argamassa assume parte dessas diferenças, adquirindo uma maior leveza, elasticidade e baixa condutibilidade térmica.

As argamassas com pellets de madeira irão necessitar de uma maior dosagem de água para atingir a mesma trabalhabilidade devido à madeira possuir uma maior absorção de água do que a areia. Os pellets também possuem uma menor massa volúmica e portanto deverão ser obtidas argamassas mais leves e com valores de condutibilidade térmica bastante mais reduzidos. Pelo mesmo motivo, é de prever que a porosidade da argamassa aumente o que trará consequências ao nível do comportamento à água da argamassa.

Apesar de não serem abordadas nesta dissertação, também é expectável que as resistências mecânicas das argamassas diminuam, devido à areia ter uma função estrutural da argamassa, e portanto sendo substituída, haverá uma “quebra” nessa função, diminuindo as resistências da mesma.

### **2.5 Argamassas com incorporação de resíduos**

Nos últimos anos tem crescido cada vez mais, a preocupação e o cuidado, em relação ao impacto ambiental que as atividades que realizamos produzem, bem como relativamente a utilização dos recursos naturais do nosso planeta.

A indústria da construção é de um sectores com preocupação acrescida devido ao sector da construção ser um dos mais prejudiciais, sendo responsável pelo consumo de 50 % dos recursos naturais, pela produção de mais de 50 % dos resíduos, pelo consumo de 40 % de energia e pela produção de 35 % das emissões de gases com efeito de estufa e CO<sub>2</sub> (Quercus, 2017).

Os conceitos de “sustentabilidade na construção” ou de “construção sustentável”, têm sido amplamente abordados e discutidos por vários autores, sendo uma das grandes problemáticas dos nossos tempos. Estes conceitos, dizem respeito, de um modo geral, à minimização dos custos de energia na construção e manutenção dos edifícios, bem como da diminuição dos consumos energéticos de arrefecimento e aquecimento.

As argamassas são um dos recursos mais utilizados na construção, tendo diversas aplicações, tanto em construções novas, como para intervenções em edifícios existentes (reabilitação). Devido a este motivo diversos estudos foram realizados de modo a tornar estes recursos cada vez mais sustentáveis, promovendo uso de novos componentes e, sobretudo, de resíduos (Fontes et al.,2012).

Também o sector industrial gera grandes quantidades de resíduos, que não têm um uso específico e são despejados em aterros. Como tal, existe uma grande necessidade de dar utilidade a esses resíduos, de forma a serem reciclados, de maneira a diminuir o seu impacto ambiental (Gadea et al. 2010). Uma das formas de reciclar esses resíduos, passa por serem utilizados em argamassas, tendo sido já realizados vários estudos nesse sentido.

Estas adições podem alterar as propriedades físicas, químicas e mecânicas das argamassas, podendo alterar ao mesmo tempo várias propriedades, conferindo melhorias numa e piores noutra, sendo necessário algum cuidado no controlo de todas as propriedades pois são estas que refletem a qualidade final da argamassa (Leal,2012).

Uma das propriedades mais abordadas na produção de argamassas mais sustentáveis, é a implementação de resíduos que possam diminuir a condutibilidade térmica. Isto advém da necessidade de tornar o edifício mais eficiente, diminuindo as suas perdas energéticas, e consequentemente fazendo também diminuir os seus consumos energéticos, ou seja as necessidades de aquecimento e de arrefecimento, que será também o objetivo principal desta dissertação.

### **2.5.1 Tipos de resíduos**

Atualmente a utilização de resíduos torna-se indispensável para a conservação do meio ambiente, por questões de economia e de eficiência (Faria et al. 2014). Como tal são cada vez mais os resíduos implementados em argamassas, de forma a substituir (de forma parcial ou total) os agregados, a substituir parcialmente o ligante, ou então como aditivos (material pozolânico).

Dos materiais mais comuns na implementação em argamassas, de modo a melhorar a condutibilidade térmica das mesmas, são os materiais isolantes térmicos, que, devido às suas propriedades térmicas, conferem às argamassas propriedades térmicas. Os materiais mais comuns utilizados neste âmbito, são o EPS e a cortiça, materiais já bastante utilizados na construção, utilizados como isolantes térmicos em coberturas, paredes simples e duplas, pavimentos e fundações (Augusto et al.,2015).

Também, os resíduos de madeira, tais como serradura ou lascas de madeira, são um dos materiais mais utilizados devido a constituírem um dos resíduos mais gerados pela indústria. A incorporação destes materiais em substituição da areia, permite uma redução da massa volumica das argamassas, diminuindo assim a sua condutibilidade térmica (Corinaldesi et al., 2016).

Os resíduos cerâmicos constituem um dos mais antigos aditivos utilizados em argamassas de construção, que remontam desde a antiguidade. Estes resíduos eram usados em substituição

do agregado ou então adicionados para melhorar as propriedades das argamassas de cal, conferindo-lhes propriedades hidráulicas (Matias et al., 2014).

Outro tipo de resíduos utilizado na incorporação de argamassas por substituição da areia, é a borracha, resultante da reciclagem de pneus, conferindo-lhes propriedades benéficas (Pedro, 2011). Também a utilização de resíduos plásticos, de maneira a combater o impacto ambiental deste material, em baixas percentagens, permite obter resultados benéficos em certas propriedades das argamassas (Silva, 2014).

Apesar de não serem considerados resíduos, outro tipo de materiais bastante utilizados nas argamassas de modo a conferir-lhes propriedades térmicas, são os “Phase Change Materials” (PCM). Estes materiais têm a capacidade de interagir com o meio exterior, alterando a temperatura do ambiente que os rodeia, sendo ativados quando existe uma alteração no meio ambiente (Monteiro et al., 2012).

## **2.5.2 Estudos realizados**

No quadro 2.4 estão enunciados alguns dos trabalhos mais relevantes utilizando resíduos em argamassas.

Nos trabalhos referidos, foram avaliadas várias propriedades, mecânicas e físicas, tanto no estado fresco como no estado endurecido. A análise destes trabalhos permite perceber que a obtenção de argamassas mais sustentáveis, através da integração de resíduos, é um campo onde já foram realizados bastantes estudos, o que denota a importância desta problemática. É expectável que no decorrer dos anos, exista um aumento na utilização deste tipo de argamassas e que novos resíduos (e consequentemente, novos estudos) sejam implementados.

Quadro 2.4 - Estudos realizados acerca de argamassas com incorporação de resíduos

Resíduo	Autor	Ligante	Traço	Integração do resíduo	Percentagens utilizadas
<b>Borracha</b>	(Pedro,2011)	Cimento	1:4	Substituição do agregado - Areia	0 a 15%
	(Eiras et al.,2014)	Cimento	-	Substituição do agregado - Areia	0 a 60%
	(Piteira,2015)	Cal hidráulica natural	1:3	Por adição	2,5 ; 5 ; 7,5%
<b>Cerâmicos</b>	(Matias et al., 2013)	Cal aérea	1:3	Substituição do agregado - Areia	20 e 40%
	(Fontes,2013)	Cal hidráulica natural	1:3	Substituição do ligante - NHL	0, 5 e 10%
	(Faria et al.,2014)	Cal hidráulica natural	1:4	Por adição	10 e 25%
<b>Cortiça</b>	(Martins,2010)	Cal hidráulica; Cal hidráulica + Cimento	1:3 ; 0,5:0,5:3	Substituição do agregado - Areia	40 a 100%
	(Brás et al., 2012)	Cimento	-	Substituição do agregado - Areia	10 a 80%
	(Leal,2012)	Cimento	1:3	Substituição do agregado - Areia	10 a 80%
	(Brás et al.,2013)	Cimento	1:3	Substituição do agregado - Areia	10 a 80%
	(Brás et al.,2014)	Cal hidráulica natural; Cimento	-	Substituição do agregado - Areia	10 a 80 %
	(Silva,2014)	Cal hidráulica; Cal hidráulica + Cimento	1:3 ; 1:1:6	Substituição do agregado - Areia	40 a 100%
<b>EPS</b>	(Lourenço, 2010)	Cimento + Cal hidratada	1:1:5	Substituição do agregado - Areia	25%
	(Vale,2014)	Cimento ; Cal + Cimento (Argamassa industrial)	1:3 ; -	Substituição do agregado - Areia	70 a 100%
	(Melo,2014)	Cimento ; Cal + Cimento (Argamassa industrial)	1:3 ; -	Substituição do agregado - Areia	70 a 100%
	(Tittarelli et al.,2016)	Cimento	1:6	Substituição do agregado - Areia	33,66 e 100%
<b>Madeira</b>	(Bederina et al.,2007)	Cimento	1:3	Substituição do agregado - Areia	6,87 a 34,34%
	(Claudiu, 2014)	Gesso	-	Substituição do ligante - Gesso	5 a 50%
	(Corinaldesi et al.,2016)	Cimento	1:2 ; 1:3	Substituição do agregado - Areia	2,5 ; 5; e 10%

Quadro 2.5 - Estudos realizados acerca de argamassas com incorporação de resíduos (continuação)

Resíduo	Autor	Ligante	Traço	Integração do resíduo	Percentagens utilizadas
<b>Outros - Espuma de poliuretano</b>	(Gadea et al., 2010)	Cimento	1:3	Substituição do agregado - Areia	0 a 100%
<b>Outros - Fibras Têxteis</b>	(Pereira et al., 2012)	Cimento	1:6	Por adição	0,25 a 5%
<b>Plásticos</b>	(Silva, 2014)	Cimento	1:4	Substituição do agregado - Areia	0 a 15%
	(Záleská et al., 2016)	Cimento	-	Substituição do agregado - Areia	0 a 50%



### 3 Caracterização do comportamento higrotérmico de edifícios

#### 3.1 Introdução

Antes de ser descrita a análise numérica realizada nesta dissertação, é necessário compreender o comportamento higrotérmico dos edifícios, e os fenómenos de calor a que estes estão sujeitos. No entanto este comportamento constitui um vasto campo, com inúmeros conceitos, não sendo possível aborda-los na totalidade, nem de uma forma demasiado complexa. Assim, no entanto, de modo a melhor compreensão da térmica dos edifícios, neste capítulo vão ser abordados os conceitos “base”, ou seja, aqueles que são considerados essenciais.

Segundo Henriques (Henriques,2011), o comportamento higrotérmico de edifícios define-se por ser o conjunto de fenómenos de natureza térmica ou relacionados com a humidade do ar que, em conjunto influenciam e determinam o comportamento que as construções vão ter quando sujeitas à sua ação.

Em seguida vão ser enunciados os principais fenómenos de transferência de calor e humidade que ocorrem num edifício.

#### 3.2 Fenómenos de transmissão de calor

Os fenómenos de transmissão de calor podem ocorrer de três formas: por condução, convecção ou por radiação. A condução e convecção apenas acontecem quando existe contacto direto entre dois corpos, ao contrário da radiação, que não necessita desse contacto.

Estes fenómenos têm como base as leis básicas da termodinâmica, sendo elas as seguintes:

- Lei Zero da Termodinâmica: irá ocorrer transferência de calor entre dois sistemas em contacto térmico se as suas temperaturas tiverem valores diferentes. Caso contrário, os sistemas encontram-se em equilíbrio térmico.

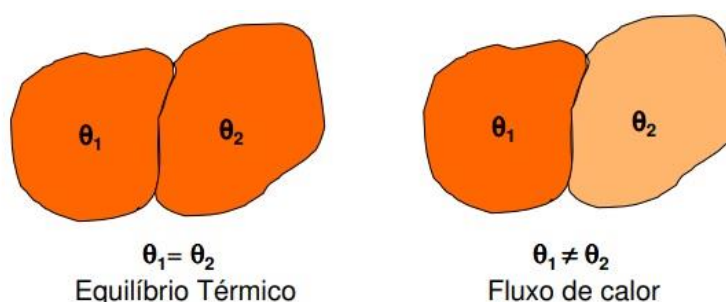


Figura 3.1 - Lei Zero da Termodinâmica (Moret Rodrigues et al.,2009)

- 2ª Lei da Termodinâmica: O calor flui do sistema mais quente para o sistema mais frio, de modo a ser estabelecido o equilíbrio térmico. Não existe passagem espontânea de um corpo com menor temperatura para outro com maior temperatura.

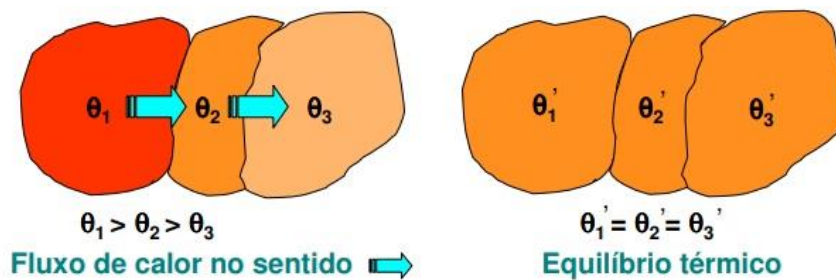


Figura 3.2 - 2ª Lei da Termodinâmica (Moret Rodrigues et al., 2009)

Nas secções seguintes será feita uma descrição de cada um destes fenómenos, para melhor compreensão das transmissões de calor.

### 3.2.1 Transmissão de calor por condução

A condução ocorre quando dois corpos se encontram em contacto a temperaturas diferentes. Este fenómeno ocorre geralmente em corpos sólidos, mas pode no entanto ocorrer em fluidos. Consoante a temperatura de um corpo ou material, existe no seu interior agitação molecular, que é tanto maior quanto maior for a temperatura do corpo em questão. Quando dois corpos com temperaturas diferentes são colocados em contacto, ocorre transmissão dessa agitação molecular no sentido da maior agitação para a menor, até ser atingido o equilíbrio entre as duas. Para mais que dois corpos, aplica-se a 2ª lei da termodinâmica (referida anteriormente), nos vários corpos, até se encontrar um equilíbrio global.

Nos materiais de construção, o aumento de temperatura deve-se sobretudo à absorção de radiação (solar), o que leva posteriormente a fenómenos de condução nos materiais adjacentes. No entanto, a capacidade de condução de calor dos materiais não é igual, existindo uns com maior capacidade do que outros, como é o caso dos metais (bons condutores de calor) e das madeiras (maus condutores de calor).

Os fenómenos de transferências de calor por condução são regidos através da Lei de Fourier, segundo o qual o fluxo de calor numa dada direção é proporcional ao gradiente de temperatura nessa direção, da condutibilidade térmica do material e da área, dado por:

$$Q_{cond} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (W) \quad (1)$$

em que:

$Q_{cond}$  – quantidade de calor transferido por condução (W);

$\lambda$  – condutibilidade térmica do material (W/m.°C);

$A$  – área da superfície (m²);

$\frac{dT}{dx}$  – gradiente de temperatura na direção  $x$ ;

No entanto esta equação constitui uma simplificação, visto que na realidade o fluxo de calor é um fenómeno tridimensional. Na térmica dos edifícios, a dimensão dos elementos



perpendiculares às faces (a espessura) possui dimensões muito mais reduzidas, logo esta simplificação pode ser aplicada, considerando o fluxo como unidirecional. Esta simplificação pode ser usada na maioria dos casos, mas existem contudo exceções, como é o caso de vigas e pilares, que devido a possuírem altos valores de condutibilidade térmica, deve ser considerado o fluxo de calor em todas as direções.

### 3.2.2 Transmissão de calor por convecção

A convecção térmica é um mecanismo de transmissão de calor típico dos fluidos, não ocorrendo em corpos sólidos. Neste fenómeno quando a temperatura de um fluido aumenta, existe uma crescente agitação molecular que provoca uma diminuição da massa volúmica no material, provocando um movimento macroscópico. A convecção pode ser natural ou forçada, sendo natural quando o movimento resulta das forças de impulsão resultantes das diferenças de densidade, e forçada quando existe a aplicação de uma força externa (como por exemplo, vento).

Nos edifícios ocorrem bastantes fenómenos de convecção e existe uma interligação destes fenómenos, aos fenómenos de condução. De maneira a haver uma maior percepção, considerem-se os seguintes casos:

No primeiro caso considere-se uma parede com temperatura superior à do ar interior. Nesse caso o ar em contacto com a parede irá aumentar a sua temperatura por condução. No entanto ao aumentar a sua temperatura, irá ocorrer uma maior agitação das moléculas, provocando uma diminuição da sua massa volúmica, o que irá provocar a subida do ar por impulsão. Ora com esta subida, o ar movimentado é substituído por ar mais frio e assim sucessivamente. No segundo caso, considere-se um teto com temperatura superior à do ar interior. Neste caso ocorrerão os processos referidos para o primeiro caso, sem movimentação do ar visto que se encontra na zona mais alta do espaço. Logo, as trocas de calor serão dadas por condução, entre as sucessivas camadas de ar. Ora analisando estes dois casos, pode-se verificar que no primeiro, as trocas térmicas por condução são maiores do que por condução, devido aos diferenciais térmicos serem maiores, no entanto isto já não acontece no segundo caso. Assim pode-se considerar que num fluido, a condução corresponde à situação limite da convecção (Henriques,2011).

As trocas de calor entre superfícies e ar, são dados pela Lei de arrefecimento de Newton:

$$Q_{conv} = h_c \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \text{ (W)} \quad (2)$$

em que:

$Q_{conv}$  – quantidade de calor transmitida;

$h_c$  – condutância térmica superficial por convecção ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ );

$A$  – área superficial de contacto entre o elemento sólido e o fluido ( $\text{m}^2$ );

$T_1$  – temperatura da superfície ( $^\circ\text{C}$ );

$T_2$  – temperatura do fluido ( $^\circ\text{C}$ ).

A condutância térmica superficial não é característica do fluido, mas sim de circunstâncias específicas, como geometria da superfície, natureza do fluido e o tipo de movimento existente (natural ou forçado).

### 3.2.3 Transmissão de calor por radiação

A radiação térmica é a radiação eletromagnética emitida por um corpo causada pela temperatura a que este se encontra. A radiação que incide sobre qualquer superfície é em parte refletida, transmitida e absorvida, em percentagens diferentes, tendo em conta as características dessa superfície.

A energia máxima de energia emitida por um corpo é designada através da lei de Stefan-Boltzmann:

$$Q_{max} = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (3)$$

em que:

$\sigma$  – constante de Stefan-Boltzmann, com o valor de  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ;

A – área ( $\text{m}^2$ );

T – temperatura absoluta (K).

No entanto este máximo de energia corresponde a corpos abstratos, chamados de corpos negros, que absorvem toda a radiação que neles incide, sendo depois emitida. A radiação de corpos reais é sempre inferior à que emitiria um corpo negro que estivesse à mesma temperatura. A radiação de corpos reais, é dada em função da radiação do corpo negro, tendo em conta a emissividade  $\varepsilon$ , que pode ser considerada uma medida da eficiência com que o corpo emite energia, comparativamente com o corpo negro (Henriques, 2011)

A energia emitida por um corpo real, é dada pela seguinte equação:

$$Q_{max} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (4)$$

Na situação em que determinada superfície se encontre completamente envolvida por outra com dimensões bastante maiores, as transferências por radiação são calculadas pela seguinte equação:

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_{env}^4) \quad (5)$$

em que:

$T_s$  – corresponde a temperatura da superfície (K);

$T_{env}$  – corresponde a temperatura da envolvente (K).

## 3.3 Caracterização do comportamento térmico dos edifícios

### 3.3.1 Conforto térmico

Quando se trata das condições de conforto térmico, existem vários fatores que influenciam as sensações de conforto que os utilizadores sentem. Claro que está que existem fatores individuais, como é o caso do metabolismo. Este fator está relacionado diretamente com a atividade que o indivíduo realiza, e em conjunto com as temperaturas envolventes provocam as sensações de frio e calor. No entanto a sensação de conforto está muito associada à

temperatura, nomeadamente às temperaturas das várias superfícies, à estratificação da temperatura em função da altura e à existência de correntes de ar.

É possível dividir os fatores que influenciam as sensações em três grupos distintos, características físicas, características fisiológicas e fatores externos, conforme apresentado no quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Fatores que influenciam a sensação de conforto (Henriques,2011)

Fatores de conforto		
Características Físicas	Características Fisiológicas	Factores Externos
Temperatura Humidade Relativa Temperatura radiante da envolvente Velocidade do ar	Idade Sexo Especificações morfológicas	Actividade desenvolvida Roupas

Dentro destes fatores, consideram-se os mais relevantes, como sendo:

- Temperatura do ar;
- Humidade relativa;
- Velocidade do ar;
- Tipo e quantidade de roupa;
- Tipo de atividade.

A temperatura interior é um dos fatores que mais influenciam as condições de conforto. Esta deve acompanhar a variação sazonal da temperatura exterior, e estar compreendida entre os 18 °C e os 26 °C. Estima-se também, que não deve haver uma variação superior de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  durante períodos de ocupação, e na estação de aquecimento (Inverno), não deve haver uma variação superior a 4°C de locais aquecidos para locais não aquecidos do edifício. Os valores relativos à velocidade do ar, deverão ser inferiores a 0,2 m/s, podendo admitir-se valores superiores em locais de atividades mais pesadas, como é o caso de oficinas e ginásios, com um limite fixado nos 0,5 m/s (Roussado, 2008).

Os últimos dois fatores são fatores externos, não havendo qualquer tipo de especificação sobre os mesmos. A roupa pode conferir ao utilizador uma maior sensação de conforto aproximando a temperatura corporal da temperatura exterior. No inverno uma maior quantidade de roupa provoca um aumento da temperatura corporal, diminuindo a diferença entre a temperatura exterior e a temperatura corporal, dando uma sensação de conforto. No Verão o processo é o inverso.

O tipo de atividade está relacionado com o metabolismo, na medida em que uma atividade física intensa vai gerar uma maior quantidade de calor produzida pelo corpo, o que irá aumentar a temperatura corporal. Atividades menos intensas como dormir ou estar sentado, também geram energia, mas numa escala bastante menor, pelo que não existem grandes aumentos na temperatura corporal.

### 3.3.2 Balanço térmico

O balanço térmico em edifícios define-se pela equação de equilíbrio entre os ganhos e as perdas energéticas que ocorrem num edifício. Através desta ferramenta, é possível obter as necessidades energéticas (de aquecimento e arrefecimento) que permitem garantir as exigências de conforto térmico.

O cálculo do balanço energético assenta na primeira lei da termodinâmica, no princípio da conversão de energia, que diz que para determinado volume de controlo, a quantidade de energia que nele entra menos a quantidade de energia que sai, para dado intervalo de tempo, é igual à quantidade de energia armazenada nesse intervalo. Considerando como volume de controlo o edifício, os ganhos de calor devido à radiação solar e à ocupação interna, as perdas e os ganhos por infiltração e por condução através da envolvente, a energia fornecida para arrefecimento/aquecimento, e outros fatores (inércia térmica da construção, por exemplo), a equação de balanço térmica fica formulada. Na figura seguinte é possível observar o balanço energético dos edifícios para as estações Verão (arrefecimento) e Inverno (aquecimento).

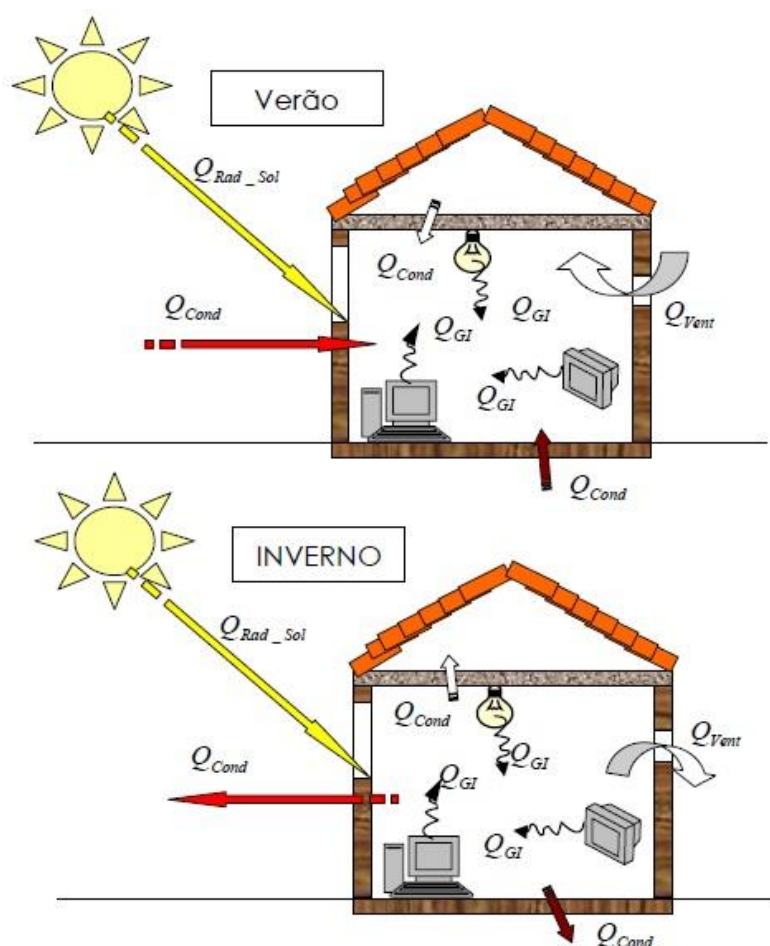


Figura 3.3 – Balanço energético (Silva,2006)

#### 3.3.2.1 Ganhos solares

Os ganhos solares designam os ganhos de energia através da radiação solar que atinge o edifício. Naturalmente, estes são um dos fatores importantes no balanço energético nas duas

estações, embora de maneiras distintas. No Inverno, os ganhos solares diminuem as necessidades de aquecimento, visto que, em quantidades consideráveis, permitem aumentar a temperatura do edifício. No Verão no entanto, uma grande quantidade tem como consequência o aumento das necessidades de arrefecimento. Deste modo, existem estratégias que podem ser implementadas para garantir um melhor aproveitamento dos ganhos solares. Por exemplo, de modo a promover os ganhos solares durante a estação de aquecimento, devem os edifícios devem possuir vãos envidraçados na fachada Sul. Pelo contrário para minimizar os ganhos na estação de arrefecimento, uma das estratégias poderá ser a aplicação de sistemas de sombreamento eficazes, especialmente para vãos cuja orientação seja Poente ou a Nascente, pois são aquelas em que na estação de arrefecimento recebem uma maior porção da radiação solar.

Os vãos envidraçados também possuem características que lhes permitem uma maior (ou menor) absorção da radiação solar. A radiação que atinge um vidro pode ser dividida em três partes, uma que é refletida para o exterior, outra que é absorvida pelo vidro e a última que é transmitida para o interior. Logicamente, apenas as duas últimas parcelas contribuem para os ganhos solares, nomeadamente para o aquecimento do interior do edifício. A parcela que é absorvida, é acumulada no elemento e depois transferida para o interior através de mecanismos de convecção e radiação. O fator solar do vidro, é a relação entre o ganho de calor através do vidro e a radiação solar incidente. Vãos envidraçados com os fatores solares baixos, serão vãos envidraçados com menores ganhos solares e portanto utilizar este tipo de vidros nos vãos envidraçados permite minimizar as necessidades de arrefecimento.

### **3.3.2.2 Ganhos Internos**

Os ganhos contabilizados para o balanço térmico não se reduzem apenas aos ganhos solares, existe ainda a parcela dos ganhos internos. Estes ganhos dizem respeito à energia proveniente da ocupação interna, nomeadamente das luzes e dos equipamentos que usamos no dia-a-dia, mas também do calor produzido pelo corpo (proveniente do metabolismo humano). Claro que estes ganhos variam consoante o tipo de edifício. Um edifício com maior número de pessoas terá uma parcela correspondente aos ganhos internos mais elevada, do que um edifício ocupado por poucas pessoas. Também um edifício destinado a ser utilizado para escritórios, terá ganhos internos elevados, não só pelo número de pessoas a que irá estar sujeito, mas sobretudo pelo grande número de equipamentos elétricos e luzes, a que este estará sujeito. Devido a estas condicionantes, os ganhos internos acabam por ser difíceis de quantificar, e por isso é usual recorrer a dados estatísticos para a obtenção de valores de cálculo ou a realizar-se uma estimativa através do consumo dos equipamentos presentes do edifício e da utilização média das luzes.

No entanto, apesar da importância desta parcela, muitas vezes, os ganhos internos acabam por ser insuficientes no Inverno e excessivos durante o Verão. Nestas situações é necessário recorrer a sistemas de climatização para garantir a temperatura de conforto para os utilizadores, o que consequentemente irá aumentar as necessidades energéticas de aquecimento e reduzir as necessidades energéticas de arrefecimento.

### **3.3.2.3 Condução de calor através da envolvente**

Restringir a condução de calor através da envolvente do edifício, constitui a estratégia mais usada de modo a diminuir as necessidades energéticas. A envolvente do edifício (paredes exteriores, cobertura e pavimento) é aquela que contacta diretamente com o exterior, e portanto é através dela que ocorrem a maioria das trocas energéticas. Portanto torna-se necessário no Inverno, restringir as perdas energéticas nestes elementos e, de maneira contrária, no Verão é necessário provocar uma diminuição nos ganhos pelo exterior, de maneira a não provocar um aumento excessivo na temperatura.

Torna-se impossível evitar qualquer troca de calor na envolvente, mas a maior parte das soluções hoje em dia, já possibilitam grandes minimizações, como é o caso da aplicação de isolamento térmico. A “filosofia” do funcionamento de aplicação do isolamento térmico na envolvente do edifício é bastante simples. Quanto mais fácil for a passagem do calor através dos elementos da envolvente, ou seja, quanto menor for o seu grau de isolamento térmico, maior será a quantidade de calor a fornecer, e por isso o consumo energético para manter a temperatura de conforto será maior. Devido a isto, qualquer edifício tem hoje em dia, soluções construtivas com recurso a isolamentos térmicos. Existem inúmeros materiais usados como isolamentos térmicos, como é o caso da lã de rocha, do poliuretano, da cortiça, do poliestireno expandido, do poliestireno extrudido, entre outros, possuindo cada um diferentes características e aplicações. No entanto apesar das suas diferenças, estes materiais têm em comum possuírem valores de condutibilidade térmica bastante reduzidos, o que confere ao elemento onde são aplicados, uma maior resistência à passagem do calor.

Como existem inúmeros materiais usados como isolamentos térmicos, também existem várias formas de aplicar este isolamento: pelo exterior da parede, pelo “meio” da parede e pelo interior da parede.

O isolamento térmico pelo exterior tem como principal vantagem a correção das pontes térmicas planas, permitindo um isolamento térmico homogéneo ao longo da parede. O isolamento aplicado no meio da parede está associado a soluções de parede dupla de alvenaria, separadas por uma caixa-de-ar preenchida parcialmente por isolamento térmico no seu interior. Este tipo de soluções constitui a solução construtiva mais corrente em Portugal, podendo mesmo ser considerada tradicional. A presença da caixa-de-ar permite a condensação do vapor de água após o isolamento térmico, onde a temperatura é mais baixa, evitando que este se acumule no exterior. Isto evita muitos problemas de revestimentos, como o empolamento da pintura ou deterioração de rodapés e instalações elétricas.

A aplicação do isolamento térmico no interior dos edifícios permite uma maior proteção do material a agentes exteriores, uma maior acessibilidade em caso de necessidade de reabilitação, mas no entanto reduz a inércia térmica e a solução está mais vulnerável a fenómenos de humidade.

Cada uma destas formas possui as suas vantagens e desvantagens, sendo que não existe uma solução perfeita, mas sim soluções que são adequadas tendo em conta o orçamento disponível, o clima da região, e a situação específica do edifício.

#### **3.3.2.4 Inércia Térmica**

A inércia térmica é a capacidade de um elemento construtivo armazenar calor e apenas libertá-lo ao fim de determinado tempo ou seja, a capacidade que os elementos de construção podem dispor de amortecer e desfazer o fluxo de calor que os atravesse (Henriques,2011). Os edifícios com esta característica possuem no Verão, no seu interior temperaturas mais reduzidas do que no exterior, e no Inverno acontece o oposto. A inércia térmica elevada é característica dos materiais maciços (como é o caso das catedrais medievais), dependendo da massa volúmica dos elementos de construção, do calor específico e da sua condutibilidade térmica.

Construções leves (caso de prefabricados em madeira) possuem uma inércia térmica muito reduzida, sendo que se não forem sujeitas a nenhum tipo de climatização, no Verão, este tipo de soluções apresentarão temperaturas muito semelhantes às do exterior. Para construções pesadas ou com inércias térmicas elevadas, a situação é inversa.

Este fator é especialmente relevante para climas sujeitos a grandes amplitudes térmicas em curtos espaços de tempo, como é o caso de Portugal, em que a inércia térmica contribui para uma estabilidade do clima no interior e consequentemente para o conforto.

### **3.3.2.5 Trocas por renovação do ar**

A renovação de ar, através da ventilação dos espaços ou devido a infiltrações, constitui uma fatia importante do balanço energético, na medida em que, através deste processo, são possíveis grandes trocas de calor com o exterior. No entanto, este processo é também fundamental pois permite diminuir a concentração dos poluentes das atividades realizadas, e a concentração de vapor de água resultante da presença de seres vivos ou das atividades domésticas (Henriques,2011).

Na maioria dos edifícios a ventilação é realizada com recurso a admissão de ar pelas janelas ou por extração através de condutas. A influência deste fator varia consoante a estação que se esteja a considerar. Em condições de Inverno, a temperatura exterior encontra-se a níveis bastantes mais baixos, do que a temperatura de conforto, e portanto existe uma tendência para se limitar este processo nesta altura, sendo que, deve ser utilizado um processo de ventilação apenas para garantir as condições de salubridade no interior dos edifícios. No Verão, a ventilação (sobretudo a ventilação natural) constitui um processo com elevada importância no arrefecimento noturno do interior dos edifícios.

É fundamental ser estabelecido um valor mínimo de renovações de ar, sendo para isso necessário um dimensionamento adequado das aberturas de admissão de ar, de modo a ser possível um equilíbrio entre a salubridade do edifício e o conforto térmico.

## **3.4 Mecanismos de transferência de humidade**

Os mecanismos de transferência de humidade são fenómenos de transferência de massa, no qual existe a migração de gases ou líquidos através de um meio poroso. No caso de edifícios, os fenómenos de transferência de humidade, são na sua generalidade a migração de água no estado líquido ou no estado de vapor, através dos poros (Henriques,2011).

A humidade nos edifícios é um dos problemas mais comuns, e resulta, direta ou indiretamente, das anomalias construtivas que o edifício possui, e, em certos casos como é o caso dos edifícios antigos, pode colocar em risco a segurança das estruturas e tornar as condições habitacionais precárias. A humidade que surge nos edifícios, pode ser originada por fenómenos de condensação, capilaridade, infiltrações, entre outros, sendo estas caracterizadas pelo aparecimento de manchas, bolores, gotejamento de água, corrosão, eflorescência e pelo aparecimento de fissuras (Silva et al.,2013).

Nesta dissertação apenas se irá abordar a humidade derivada por fenómenos de condensação, sendo estes caracterizados nas seguintes secções.

### **3.4.1 Condensações superficiais**

Quando ocorre o arrefecimento do ar interior, mantendo-se constante a humidade absoluta, existe um aumento da humidade relativa, podendo atingir a saturação. No caso de esta ocorrer, existem condensações de vapor de água nos paramentos das paredes, tetos ou pavimentos, sendo designados por condensações superficiais (Henriques,2011). Estas, são causadoras de problemas com alguma gravidade, devido ao aparecimento de água nos elementos construtivos, podendo degrada-los de várias formas, tendo gravidade acrescida nas zonas de pontes térmicas, que é o caso da generalidade dos elementos estruturais.

A quantidade de vapor de água, existente no ar, exerce determinada pressão, designada por pressão parcial,  $P_p$ , que será tanto maior quanto maior quantidade de vapor de água existir. No entanto a quantidade de vapor de água que pode existir no ar é limitada. Quando esse limite é ultrapassado, o ar já não consegue absorver o vapor de água, ocorrendo a saturação. Este limite

é designado por limite de saturação,  $W_s$ , ao qual corresponde uma pressão de saturação,  $P_s$ . A humidade relativa está relacionada com estes dois conceitos, na medida em que traduz a relação percentual entre a quantidade de vapor de água que existe por unidade de ar e o respetivo limite de saturação, ou relação entre a pressão parcial e a pressão de saturação. Mas no entanto, o limite de saturação não é constante, variando com a temperatura. Quanto maior a temperatura maior será o limite de saturação, provocando um decréscimo na humidade relativa, e para menores temperaturas, o limite de saturação será menor, aumentando a humidade relativa, mantendo-se a mesma humidade absoluta. É nesta situação, que o ar ao entrar em contacto com elementos de construção com menores temperaturas, pode fazer com que o valor da humidade absoluta ultrapasse o limite de saturação, ocorrendo assim condensações superficiais (Duarte,2010). As fórmulas seguintes, referem-se ao cálculo da humidade relativa, através dos conceitos mencionados:

$$Hr = \frac{Ha}{W_s} \times 100 \quad (6)$$

em que:

Ha – Humidade absoluta em kg/m<sup>3</sup>;

Ws – limite de saturação em kg/m<sup>3</sup>;

Hr – Humidade relativa em percentagem.

$$Hr = \frac{P_p}{P_s} \times 100 \quad (7)$$

em que:

Pp – Pressão parcial em Pa;

Ps – Pressão de saturação em Pa.

A pressão de saturação pode ser obtida com recurso às equações seguintes:

$$P_s = 611 \cdot e^{\left(\frac{22,44 \cdot t}{272,44 + t}\right)} \quad (8)$$

para  $t < 0^\circ\text{C}$

$$P_s = 611 \cdot e^{\left(\frac{17,08 \cdot t}{234,18 + t}\right)} \quad (9)$$

para  $t \geq 0^\circ\text{C}$

em que :

t – temperatura em °C.



Com recurso a diagrama psicométrico, representado na figura 3.4, é possível perceber as relações existentes entre as humidade absoluta, humidade relativa e a temperatura do ar, permitindo perceber para que casos ocorrem condensações. Neste tipo de diagramas apresentam-se em abcissas os valores da temperatura (em °C), em ordenada os valores da concentração de vapor de água (em g/m³) e da pressão de saturação (em Pa), bem como, um conjunto de curvas de humidade relativa (em %). Neste diagrama, as linhas horizontais representam pontos com igual concentração de vapor de água e as verticais pontos com igual temperatura (Henriques,2011).

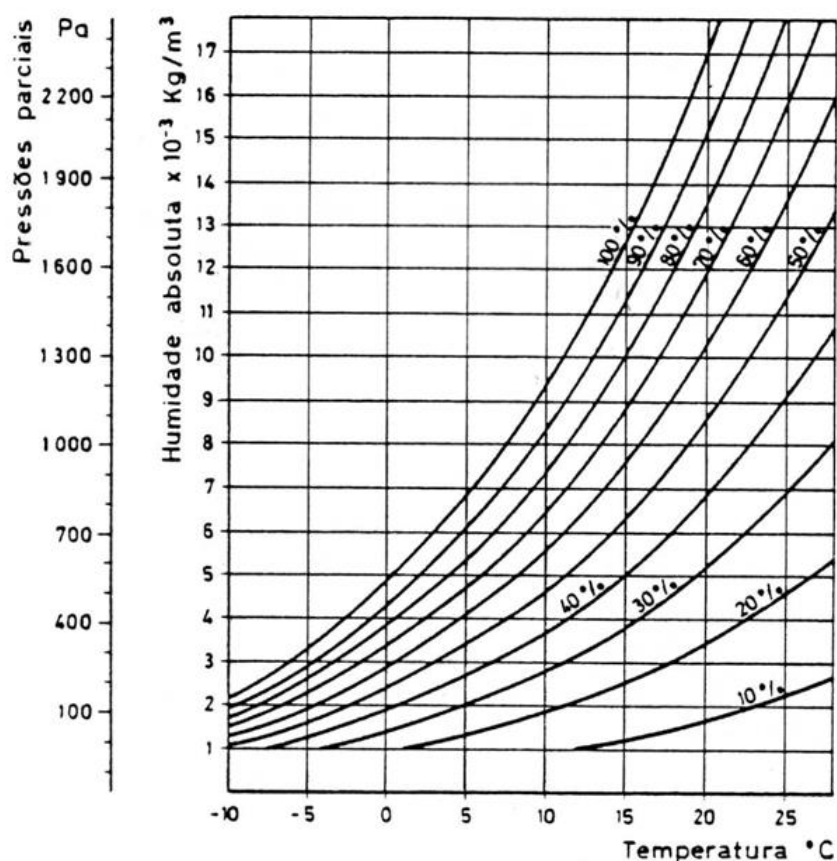


Figura 3.4 - Diagrama Psicométrico (Henriques 2011)

Além das variações higrótérmicas do ar no interior do edifício, as condensações superficiais dependem ainda das temperaturas a que os elementos construtivos se encontrem, nomeadamente das suas temperaturas superficiais. Conforme referido anteriormente, o limite de saturação varia com a temperatura, sendo menor para temperaturas reduzidas. Ora quando uma camada de ar entra em contacto com um elemento construtivo a temperaturas reduzidas, o limite de saturação diminui, e a humidade absoluta pode passar este limite, provocando a ocorrência de condensações. Após esta análise, é possível constatar que quanto menor for a temperatura superficial interior, maior será a probabilidade da ocorrência de condensações superficiais. A temperatura superficial interior, é dada pela seguinte equação:

$$\theta_{si} = \theta_i - R_{si} \cdot U \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad (10)$$

em que:

$\theta_{si}$  – temperatura superficial interior (°C)

$\theta_i$  – temperatura interior ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\theta_e$  – temperatura exterior ( $^{\circ}\text{C}$ )

$R_{si}$  – resistência térmica superficial interior, cujos valores se encontram no quadro 3.2.

$U$  – coeficiente de transmissão térmica ( $\text{W}/\text{m}^2.\text{C}$ )

Quadro 3.2 - Resistências térmicas superficiais convencionais (Henriques, 2011)

Sentido do fluxo de calor		Resistências térmicas superficiais ( $\text{m}^2.\text{C}/\text{W}$ )		
		$R_{se} = 1/h_e$	$R_{si} = 1/h_i$	$R_{se} = 1/h_e$
Horizontal		0,04	0,13	0,17
Vertical	ascendente	0,04	0,1	0,14
	descendente	0,04	0,17	0,21

Observando a equação, facilmente se verifica que a característica do elemento construtivo que influencia a sua temperatura superficial é o coeficiente de transmissão térmica. É fácil compreender que as pontes térmicas são os elementos construtivos mais afetados, devido aos valores elevados de  $U$ , possuindo assim temperaturas superficiais menores que os outros elementos. É possível perceber que quanto maior for o isolamento térmico (ou seja, quanto menores forem os valores de  $U$ ) mais elevada será a temperatura superficial do elemento e por isso, menor será o risco de condensações.

### 3.4.2 Condensações internas

As condensações não ocorrem apenas na superfície dos elementos construtivos, este fenómeno pode ocorrer no interior das paredes, sendo por isso designado como condensações internas. Para analisar este tipo de condensações utiliza-se normalmente o método de *Glaser*, utilizando os valores de pressão de vapor de água em vez das humidades absolutas.

Apesar de possuir algumas limitações, este método é bastante utilizado para verificar a ocorrência de condensações e assume que num elemento construtivo sujeito a um gradiente de pressões e temperaturas, a pressão de saturação é variável de ponto para ponto. Como tal, é possível traçar duas curvas: a curva de pressões instaladas (pressões parciais de vapor de água) e a curva de pressões de saturação. Apenas haverá condensações internas se houver interseção destas duas curvas, caso contrário, as condensações não ocorrerão.

Este método tem algumas condicionantes e simplificações, sendo algumas delas as seguintes:

- Os elementos construtivos têm que ser constituídos por camadas paralelas entre si;
- Assume apenas a existência de vapor de água, não considerando efeitos de higroscopicidade;
- Assume valores constantes de permeabilidade ao vapor de água;
- Não considera efeitos de inércia térmica;
- O transporte de calor dá-se apenas por condução;
- Os elementos de construção são estanques ao ar;
- O regime é permanente;
- Os coeficientes de permeabilidade ao vapor de água e de condutibilidade térmica são constantes.

Para a aplicação deste método é necessário conhecer alguns parâmetros, sendo eles:

- Temperatura interior e exterior ( $\theta_i$  e  $\theta_e$ );
- Pressão parcial no interior e no exterior ( $P_i$  e  $P_e$ );
- Coeficientes de permeabilidade ao vapor de água dos materiais ( $\delta$ );
- Coeficientes de condutibilidade térmica dos materiais ( $\lambda$ );
- Espessura das camadas que constituem a parede ( $d$ );
- Resistências térmicas superficiais ( $R_{si}$  e  $R_{se}$ ).

Através deste método o fluxo de vapor de água que atravessa os elementos de construção é dado pela seguinte expressão:

$$g = \frac{P_i - P_e}{\sum \frac{d_i}{\delta_i}} \quad (11)$$

em que:

$g$  – fluxo de difusão de vapor de água por unidade de superfície ( $\text{kg/m}^2.\text{s}$ );

$\delta_i$  – coeficiente de permeabilidade ao vapor de água da camada  $i$  ( $\text{kg/m.s.Pa}$ );

$d_i$  – espessura da camada  $i$  (m);

$P_i$  – pressão parcial de vapor de água no interior (Pa);

$P_e$  – pressão parcial de vapor de água no exterior (Pa).

O fluxo de calor é dado pela seguinte fórmula, tendo em conta a lei de Fourier:

$$q = \frac{\theta_{si} - \theta_{se}}{\sum \frac{d_n}{\lambda_n}} \quad (12)$$

em que:

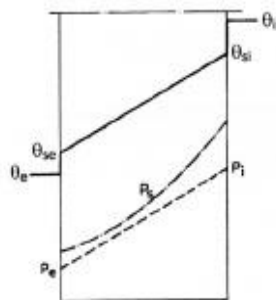
$q$  – fluxo de calor por unidade de superfície ( $\text{W/m}^2$ );

$\lambda_n$  – coeficiente de condutibilidade térmica da camada  $i$  ( $\text{W/m.}^\circ\text{C}$ );

$\theta_{si}$  – temperatura interior ( $^\circ\text{C}$ );

$\theta_{se}$  – temperatura exterior ( $^\circ\text{C}$ ).

Através das equações 9 e 12, é possível obter, primeiramente as temperaturas nos diversos pontos do elemento construtivo e analisar, e em seguida as respectivas pressões de saturação, podendo traçar uma curva. Com recurso à equação 11, é possível determinar as pressões instaladas no elemento, e assim traçar a segunda curva. Na figura 3.5 apresenta-se um exemplo da aplicação do método de Glaser numa parede homogênea.



*Figura 3.5 - Mecanismos de difusão numa parede homogênea (Henriques,2011).*

Após o traçado estar completo, é necessário realizar uma análise das curvas. Se houver interseção entre a curva das pressões de saturação com a curva das pressões instaladas, irão ocorrer condensações. Neste caso, é possível delimitar a zona onde ocorrem as condensações, através do traçado de tangentes à curva das pressões de saturação a partir dos pontos que definem as pressões instaladas nas suas faces.

## 4 Análise dinâmica do comportamento térmico dos edifícios – *Energy Plus*

### 4.1 Introdução

O Energy Plus é um programa informático desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), que teve a sua génese nos programas BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) e DOE-2 lançados para o mercado no final da década de 70 e no início dos anos 80.

Com o passar dos anos foi crescendo a necessidade da criação de um programa que efetuasse uma análise dando mais ênfase não só ao cálculo das cargas térmicas, mas também aos sistemas de climatização e ventilação, e forma de como estes iriam influenciar os consumos energéticos de um edifício.

Sendo assim, baseado nos dois programas que o precederam, e sobrepondo as falhas de cada um, surgiu o Energy Plus, um programa de análise energética e de simulações térmicas utilizado na simulação do comportamento térmico de edifícios. Através deste é possível desenvolver estudos para a melhoria da eficiência energética de edificações existentes ou em fase de projeto, sendo esta possibilidade uma mais-valia.

Trata-se de um programa gratuito, sendo possível descarrega-lo no *website* oficial. A sua primeira versão (1.0) foi lançada em 2001, encontrando-se atualmente na versão 8.7, lançada em 2017. Na presente dissertação utilizou-se a versão 8.4.

O Energy Plus é constituído por vários módulos internos, que permitam uma mais fácil organização de dados de entrada e introdução de mais opções de cálculo. Nos seus algoritmos de cálculo considera princípios de volume de controlo e conservação de massa e energia, transmissão de calor por condução, convecção e radiação. Na figura 4.1 podemos observar a constituição do *Energy Plus* e os seus módulos.

O *Energy Plus* tem uma metodologia de cálculo dinâmico, permitindo desta forma uma análise mais complexa, complementando mais parâmetros e, tornando assim as simulações realizadas

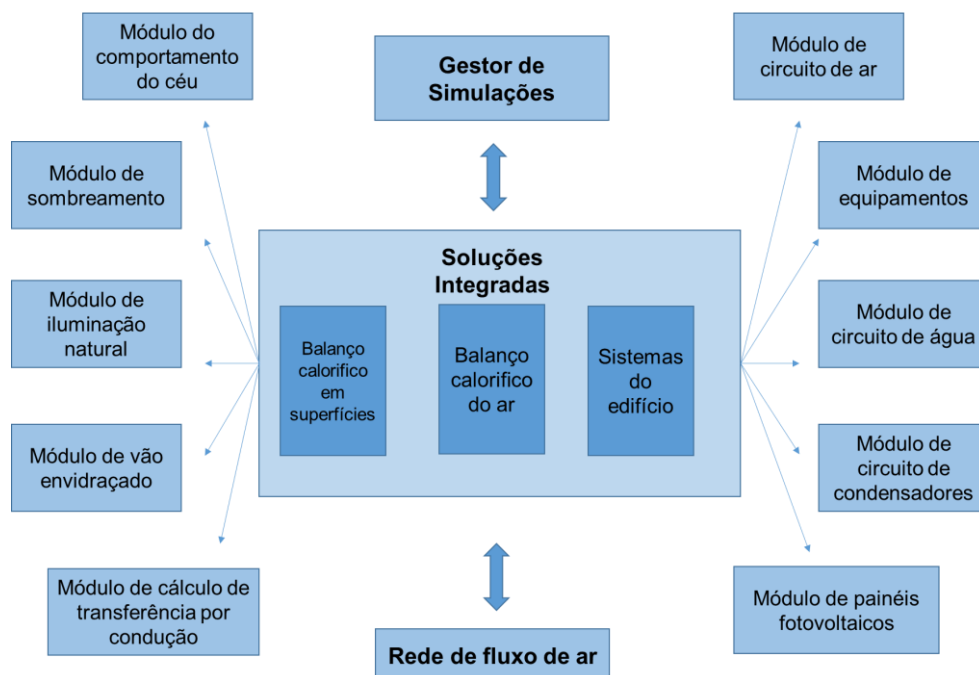


Figura 4.1 - Módulos internos Energy Plus

por esta ferramenta, mais realistas, quando comparado com outros métodos. Nesta abordagem

o programa considera os fenómenos de transferência de calor entre o edifício e o meio exterior, sendo que o interior do edifício se encontra em constante interação com o meio exterior, durante o período da simulação.

Baseado no *input* introduzido pelo utilizador, no qual permite introduzir diversos parâmetros (geometria do edifício, materiais da envolvente, sistemas e regimes de climatização, ficheiros de dados climáticos relativos à zona de implantação), este programa permite o cálculo das necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento de acordo com os padrões de conforto térmico definidos. O *input* é realizado através de ficheiros do tipo IDF (Input Data Files), onde o utilizador introduz os parâmetros desejados, de modo a realizar a simulação, que depois são agrupados segundo a categoria a que pertencem, no *IDF Editor*. Na figura 4.2 pode ser observado o formato do *IDF Editor*.

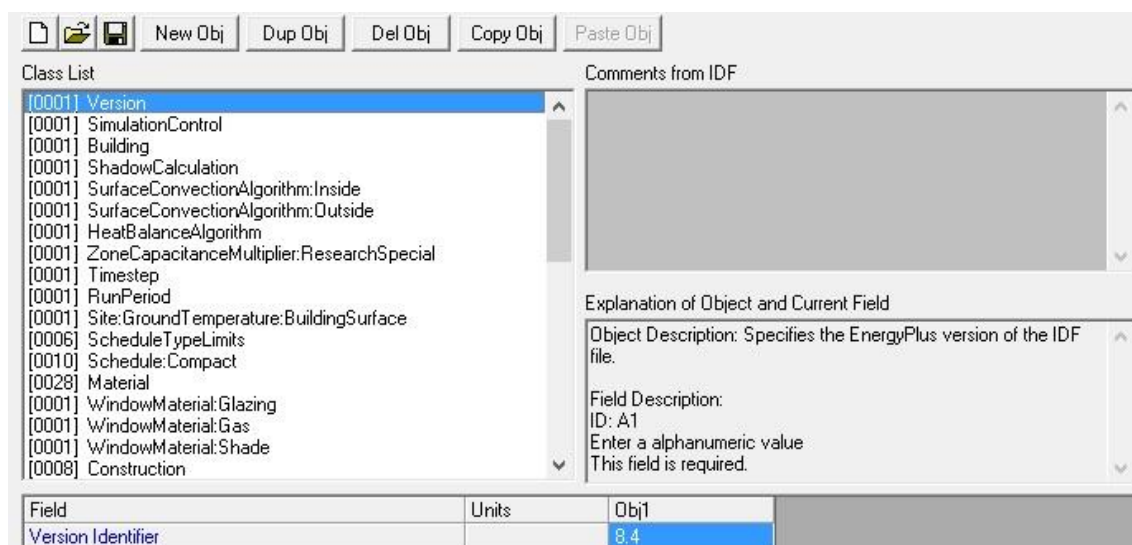


Figura 4.2 - IDF Editor

O programa disponibiliza um elevado número de *outputs* possibilitando avaliar a influência de imensos parâmetros de simulação. No entanto apesar de poder constituir uma vantagem, pode ao mesmo tempo ter um efeito negativo, devido ao grande número poder causar confusão no utilizador na escolha do *output* adequado para a sua simulação, provocando uma análise bastante extensa.

Após introdução dos *inputs* e *outputs* adequados no *IDF Editor*, as simulações são realizadas noutra plataforma do Energy Plus, o *EP-Launch* (Fig. 4.3.). Nesta plataforma são introduzidos os ficheiros climáticos e o ficheiro modelo, e são obtidos os resultados da simulação (disponíveis em vários formatos) e a informação acerca de eventuais erros da simulação.

O Energy Plus utiliza nas suas simulações ficheiros climáticos próprios que possuem a informação detalhada de vários parâmetros, como, a temperatura exterior, a humidade, a radiação incidente, etc. Sendo um programa utilizado internacionalmente, possui dados climáticos para vários locais no mundo, cerca de 2100 localizações, sendo que para Portugal possui para as regiões de Bragança, Coimbra, Évora, Faro, Funchal, Lajes, Lisboa e Porto. As informações presentes nos ficheiros climáticos tiveram origem no INETI (Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação) recolhidas com base nos dados disponibilizados pelo Instituto de Meteorologia entre 1951-1980 e no IWEI (Internacional Weather for Energy Calculations) e de informações recolhidas pelo *United States National Climatic Data Center* entre 1982-1999.

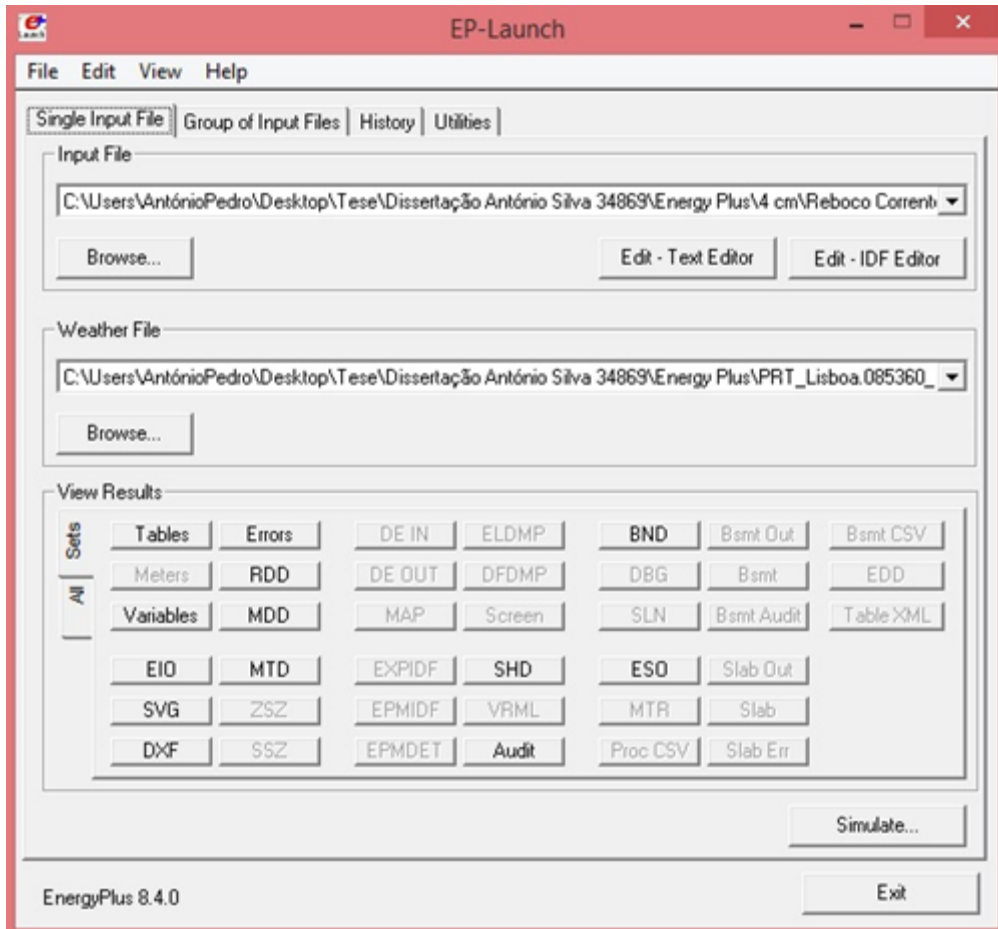


Figura 4.3 - EP-Launch

Relativamente ao cálculo das necessidades energéticas, o Energy Plus efectua a contabilização do balanço energético, com base na seguinte equação:

$$C_z \frac{d\theta_i}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{si}} \dot{Q}_g + \sum_{i=1}^{N_{sup}} h_{si} A_i (\theta_{si} - \theta_i) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_{inf} C_p (\theta_e - \theta_i) + \dot{m}_{coup} C_p (\theta_{zones} - \theta_i) + Q_{sts} \quad (13)$$

sendo que:

$C_z \frac{d\theta_i}{dt}$  : corresponde a energia armazenada na zona (Z);

$\sum_{i=1}^{N_{si}} \dot{Q}_g$  : corresponde ao somatório de cargas internas por convecção;

$\sum_{i=1}^{N_{sup}} h_{si} A_i (\theta_{si} - \theta_i)$  : corresponde à transferência de calor por convecção das superfícies interiores da zona (Z);

$\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_{inf} C_p (\theta_e - \theta_i)$  : corresponde à transferência de calor devido a infiltrações às do ar exterior na zona (Z);

$\dot{m}_{coup} C_p (\theta_{zones} - \theta_i)$  : corresponde à transferência de calor devido a trocas de ar entre zonas ;

$Q_{sts}$  : corresponde ao fluxo dZ calor associado aos sistemas instalados.

## 4.2 Metodologia utilizada no caso em estudo

Após uma breve introdução ao programa utilizado, e ao seu funcionamento, na modelação energética, é apresentado nesta secção o modelo utilizado nas simulações realizadas.

Na figura 4.4 pode observar-se o modelo do edifício utilizado no presente estudo. O modelo foi adaptado com base nas plantas de uma moradia existente. Trata-se de um edifício unifamiliar constituído por 2 pisos, tendo uma área de pavimento de 116,2 m<sup>2</sup>, uma área de envolvente opaca vertical de 563,4 m<sup>2</sup> e um pé direito de 2,7 m.

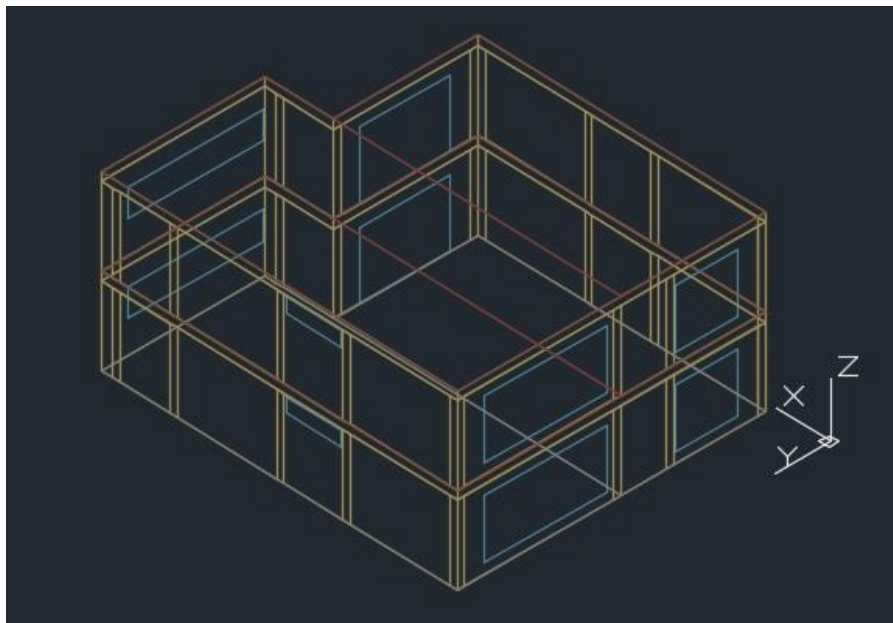


Figura 4.4 - Modelo utilizado

De seguida, são descritos os *inputs* introduzidos no *Energy Plus* para realizar as simulações. É de referir que se adotou a predefinição do *Energy Plus*, para os parâmetros que aqui não são referenciados.

## 4.3 Parâmetros de simulação

Conforme referido na secção anterior, para a realização das simulações, é necessário proceder primeiro à introdução de alguns parâmetros básicos. Começa-se então por preencher os campos pertencentes ao grupo “Parâmetros de simulação” (Simulation Parameters).

### 4.3.1 Versão

É, usualmente, o primeiro campo a ser preenchido, em que apenas é definida a versão do Energy Plus com o qual irão ser realizadas as simulações. Conforme referido anteriormente, a versão utilizada foi a 8.4.

### 4.3.2 Edifício

Neste parâmetro são introduzidas algumas características referentes ao edifício simulado.



No campo “Name” define-se o nome pelo qual vamos identificar o edifício.

Em “North Axis” indica-se os graus que o edifício em estudo faz em relação ao norte. Na simulação realizada optou-se por admitir 0 graus.

O campo “Terrain” define como o vento atinge o edifício. Para isso é necessário então definir o tipo de terreno onde está inserido o edifício, escolhendo entre “Country”, “Suburbs”, “City”, “Ocean”, “Urban”. Estando o edifício localizado em Lisboa (relativamente próximo do mar e perto do rio Tejo) optou-se pela opção “Ocean”.

Para definir a influência da distribuição da luz solar e os sombreamentos no interior do edifício, utiliza-se o campo “Solar Distribution”. Podemos escolher entre cinco opções: “MinimalShadowing”, “FullExterior”, “FullInteriorAndExterior”, “FullExteriorWithReflections” e “FullInteriorAndExteriorWithReflections”.

Optou-se pelo valor “FullExterior” definindo assim sombreamentos causados por elementos exteriores ao edifício, em que a entrada da luz solar entra no interior do edifício incidindo apenas no pavimento. Trata-se de uma simplificação em relação aos sombreamentos e à distribuição solar, mas no entanto, esta deve-se ao facto de o edifício possuir uma forma não-convexa. Para edifícios convexos, opções mais realistas e mais complexas podem ser adotadas.

#### 4.3.3 Algoritmo de convecção: Interior

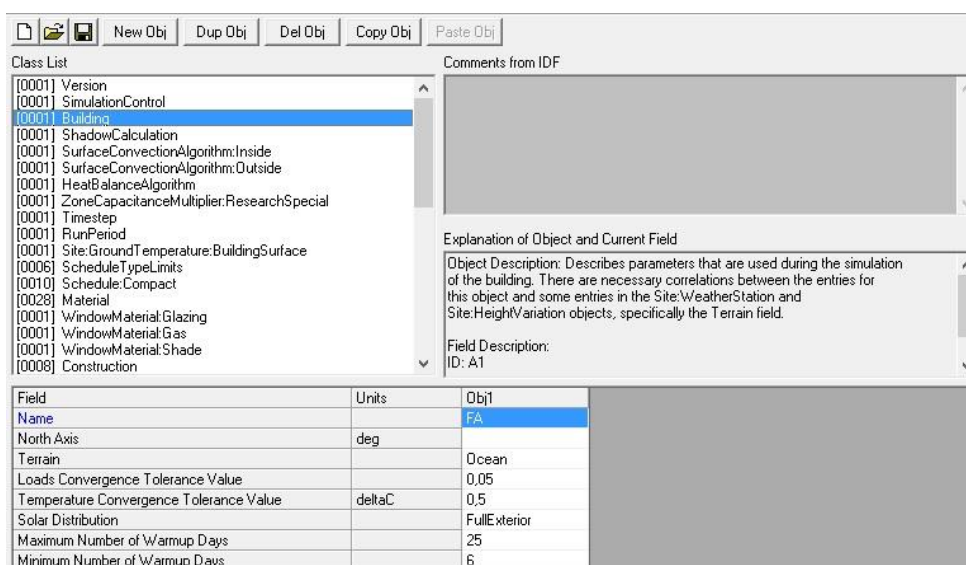


Figura 4.5 - Parâmetro “Building”

Neste campo definem-se os algoritmos que o programa irá usar para o cálculo das trocas de calor por convecção nas superfícies do edifício em contacto com o ar interior. Escolheu-se a opção “Simple” adotando assim um modelo com transferências de calor constantes e coeficientes de transferência de calor constantes dependendo da orientação da superfície.

#### 4.3.4 Algoritmo de convecção: Exterior

À semelhança do parâmetro anterior, este campo define o algoritmo utilizado para o cálculo das trocas de calor por convecção nas superfícies do edifício em contacto com o ar exterior. Adotou-se a opção “SimpleCombined” definindo assim um algoritmo que considera os coeficientes de transferência de calor dependendo da rugosidade e da velocidade do vento.

### 4.3.5 Timestep

Este campo define o número de simulações que vão ser realizadas numa hora, ou seja, se se definir um número alto, o *Energy Plus* realiza um grande número de simulações, permitindo obter resultados bastantes pormenorizados ao longo de um dia. No entanto um número elevado origina um excesso de informações e torna as simulações mais lentas. O *Energy Plus* apenas permite a introdução de valores que sejam divisíveis por 60.

Nas simulações realizadas para esta simulação utilizou-se um *timestep* (recomendado) de 6.

## 4.4 Localização e Clima

Neste campo são inseridas informações acerca da localização do edifício. Adotou-se como localização do edifício a cidade de Lisboa, utilizando para isso o ficheiro climático dessa zona, disponível no *website* do programa.

No entanto caso o ficheiro climático não estivesse disponível, era possível introduzir os dados relativos à localização do edifício (latitude, longitude, fuso horário e elevação) e ao clima (temperatura do solo, pressão barométrica, velocidade do vento, etc..) para deste modo realizar a simulação.

### 4.4.1 Período de simulação

Em *RunPeriod* é definido o período de tempo, no qual se vai realizar a simulação.

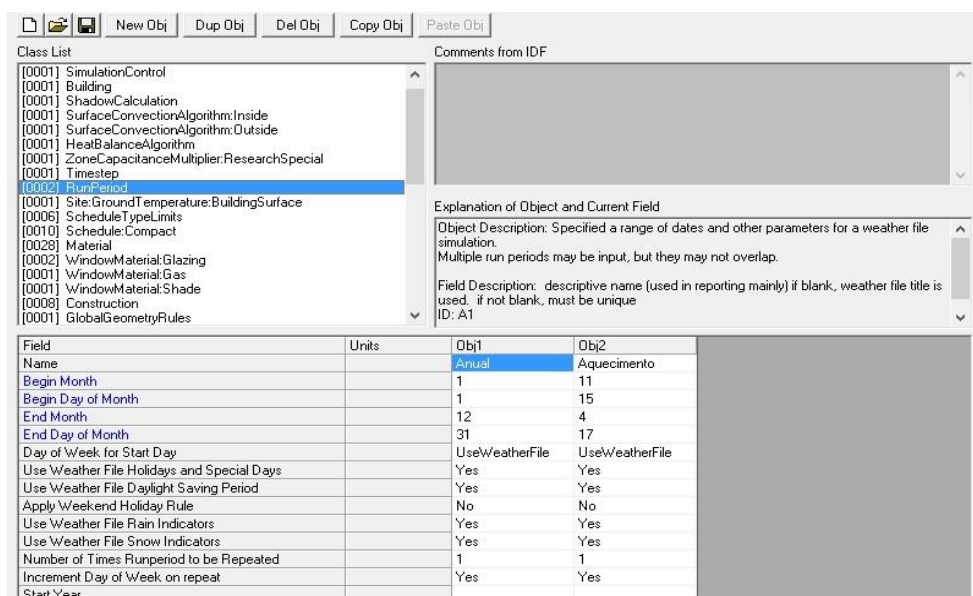


Figura 4.6 – Período de simulação

Foram definidos dois períodos de simulação. O primeiro, denominado “Anual”, representa o ano inteiro, e foi utilizado para simular as necessidades de aquecimento e arrefecimento do edifício.

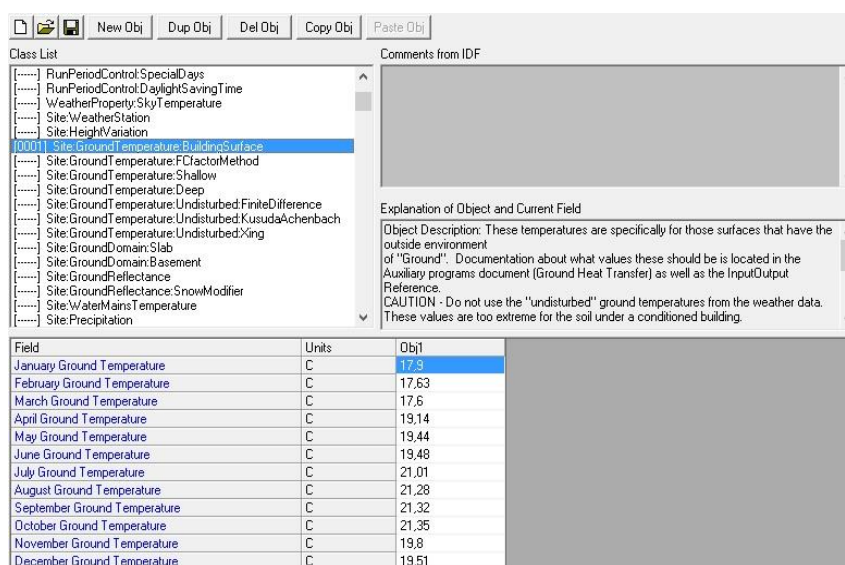
O segundo “Aquecimento”, utilizou-se para obter as perdas térmicas por condução na envolvente opaca (que acontecem essencialmente no período de aquecimento). Este período foi definido de 15 de Novembro a 17 de Abril.

#### 4.4.2 Temperatura do solo: Superfície do edifício

Neste campo são definidas as temperaturas do solo, relativas à localização do edifício. Apesar de o ficheiro climático possuir dados relativos as temperaturas do solo, o *Energy Plus*, necessita de criar um modelo para ao solo de forma a conseguir quantificar as trocas térmicas com o terreno. Para isso utiliza um programa auxiliar o “*Slab*”, para calcular as temperaturas do solo para um dado ficheiro climático.

Com recurso ao “*Slab*” foram calculadas as temperaturas do solo para o modelo simulado, que podemos observar na figura 4.7. O *Energy Plus* considera que a temperatura do solo é constante mensalmente.

#### 4.5 Horários



Field	Units	Obj1
January Ground Temperature	C	17,3
February Ground Temperature	C	17,63
March Ground Temperature	C	17,6
April Ground Temperature	C	19,14
May Ground Temperature	C	19,44
June Ground Temperature	C	19,48
July Ground Temperature	C	21,01
August Ground Temperature	C	21,28
September Ground Temperature	C	21,32
October Ground Temperature	C	21,35
November Ground Temperature	C	19,8
December Ground Temperature	C	19,51

Figura 4.7 – Temperaturas do solo

Neste campo podemos definir os horários de utilização de vários parâmetros, tais como: volume de ocupação, iluminação, infiltrações, controlo de temperatura, sombreamentos, etc.

##### 4.5.1 Horários: Limites

Neste campo são definidos os tipos de valores e os limites (mínimo e máximo) contidos em “*Schedule:Compact*”. Na figura 4.8, apresentam-se as variáveis utilizadas na presente dissertação.

Observando a figura, verifica-se que os limites utilizados foram “Percentagem”, “Ligar/Desligar”, “Actividade”, “Temperatura”, “Humidade Relativa” e “Controlo”.

Para cada um destes limites foi definido o seu valor mínimo, o seu valor máximo, o tipo de valor numérico (contínuo ou discreto) e o tipo de unidade (adimensional, temperatura, percentagem, nível de atividade, controlo, etc.).

Relativamente ao tipo de valor numérico, utiliza-se um valor contínuo para parâmetros em se possa escolher qualquer número real entre o valor máximo e o valor mínimo, como para “Temperatura”, “Humidade Relativa”, “Actividade” e “Percentagem”. Para os parâmetros em que apenas possa escolher o valor máximo ou o valor mínimo, ou seja, que não possuam valores

intermédios, utiliza-se um valor do tipo discreto, como é o caso do limite “Ligar/Desligar” e “Controlo”.

<div><div><div>New ObjDup ObjDel ObjCopy ObjPaste Obj</div><div>Class List</div><div>Schedules</div><div><div>10003 ScheduleTypeLimits</div><div>Schedule Day/Interval</div><div>Schedule Day/Interval</div><div>Schedule Week/Daily</div><div>Schedule Week/Compact</div><div>Schedule Year</div><div>10010 Schedule Compact</div><div>Schedule Constant</div><div>Schedule File</div></div><div>Surface Construction Elements</div><div><div>10028 Material</div><div>MaterialNoMass</div><div>MaterialInfraredTransparent</div></div></div></div> <div><div>Comments from IDF</div><div>Explanation of Object and Current Field</div><div>Object Description: ScheduleTypeLimits specifies the data types and limits for the values contained in schedules</div><div>Field Description: used to validate schedule types in various schedule objects</div><div>ID: A1</div><div>Enter an alphanumeric value</div><div>This field is required.</div></div>							
Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		Percentagem	Ligar/desligar	Actividade	Temperatura	Humidade Relativa	Controlo
Lower Limit Value	varies	0	0	0	-50	0	0
Upper Limit Value	varies	1	1	909	150	100	4
Numeric Type		Continuous	Discrete	Continuous	Continuous	Continuous	Discrete
Unit Type		Percent	Dimensionless	ActivityLevel	Temperature	Dimensionless	Dimensionless

Figura 4.8 – Horários : Limites

4.5.2 Horários: Compacto

Após terem sido definidos os tipos de valores e os seus limites, podem ser definidos os parâmetros a utilizar e os horários de utilização para cada um.

Na figura 4.9 estão representados todos os parâmetros utilizados e os respetivos períodos de utilização.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9	Obj10
Name		Iluminação	Ventilação	Actividades	Ocupação	Equipamentos	Temperatura min	Temperatura máx	Humidade máx	Humidade min	A/C
Schedule Type Limits Name		Percentagem	Ligar/desligar	Actividade	Percentagem	Percentagem	Temperatura	Temperatura	Humidade Relativa	Humidade Relativa	Controlo
Field 1	varies	Through 4/30	Through 12/31	Through 12/31	Through 12/31	Through 12/31	Through 12/31	Through 12/31	Through 12/31	Through 12/31	Through 12/31
Field 2	varies	ForAllDays	ForAllDays	ForAllDays	ForAllDays	ForAllDays	ForAllDays	ForAllDays	ForAllDays	ForAllDays	ForAllDays
Field 3	varies	Unit 18:00	Unit 24:00	Unit 07:00	Unit 07:00	Unit 24:00	Unit 24:00	Unit 24:00	Unit 24:00	Unit 24:00	Unit 24:00
Field 4	varies	.05	1	100	1	.06	18	24	65	50	4
Field 5	varies	Unit 24:00			Unit 08:00	Unit 08:00					
Field 6	varies	7			0	.01					
Field 7	varies	Through 9/30			Unit 13:00	Unit 13:00					
Field 8	varies	ForAllDays			.75	.08					
Field 9	varies	Unit 18:00			Unit 14:00	Unit 14:00					
Field 10	varies	.05			0	.01					
Field 11	varies	Unit 24:00			Unit 17:00	Unit 17:00					
Field 12	varies	5			.75	.08					
Field 13	varies	Through 12/31			Unit 18:00	Unit 18:00					
Field 14	varies	ForAllDays			1	.14					
Field 15	varies	Unit 18:00			Unit 24:00	Unit 24:00					
Field 16	varies	.05									
Field 17	varies	Unit 24:00									
Field 18	varies	7									

Figura 4.9 – Horários: Compacto

Em seguida realiza-se uma breve explicação acerca de cada um destes parâmetros.

4.5.2.1 Iluminação

Este parâmetro define a iluminação do edifício ao longo do ano. Foi utilizado para esse efeito o limite “Percentagem” definindo assim o parâmetro por percentagens, em que o valor 0 corresponde a 0% de iluminação dentro do edifício, ou seja, nenhuma, e o valor 1 corresponde a 100 % de iluminação no edifício.

Sendo assim foi definido de 1 de Janeiro até dia 30 de Abril, uma iluminação de 5 % até as 18h e de 70 % das 18h até às 24h.

De 30 de Abril até 30 de Setembro, uma iluminação de 5% até as 18h e de 50 % das 18h até às 24h.

Por fim, de 30 de Setembro até 31 de Dezembro definiu-se uma iluminação de 5 % até às 18h e de 70 % das 18h até às 24h.

#### 4.5.2.2 Ventilação

O parâmetro “Ventilação”, tal como o nome indica, define a ventilação mecânica do edifício, sendo definido através do limite “Ligar/Desligar”. Através deste limite apenas é possível definir dois modos de utilização deste parâmetro, podendo estar ligado, ou desligado, tornando-o bastante simples.

Sendo assim foi definido que para todos os dias, de 1 de Janeiro até dia 31 de Dezembro, a ventilação encontra-se ligada.

#### 4.5.2.3 Actividades

Neste parâmetro é definido o valor do metabolismo das actividades, tendo sido definido o valor de 100W/pessoa.

Este parâmetro irá ser utilizado noutro campo do *Energy Plus*, pelo que será abordado posteriormente.

#### 4.5.2.4 Ocupação

Em “Ocupação” é definido a ocupação do edifício em estudo, definida através do limite “Percentagem”. À semelhança do parâmetro “Iluminação”, são definidas várias percentagens de ocupação, sendo o valor 0 correspondente ao edifício sem qualquer pessoa e o valor 1 ao valor máximo de ocupação definido.

Sendo assim, de modo a simplificar este parâmetro, foram definidos os mesmos valores de ocupação para o ano inteiro, de 1 de Janeiro até 31 de Dezembro: das 7h até às 8h a ocupação é total, das 8h até às 13h não há ninguém no edifício, das 13h até às 14h encontram-se na fração 75% do total de ocupantes, das 14h até às 17h o edifício está vazio, das 17h às 18h novamente 75 % dos ocupantes e por fim das 18h até às 7h a ocupação é total.

#### 4.5.2.5 Equipamentos

Quadro 4.1 - Equipamentos elétricos utilizados

Equipamentos	W
Placa elétrica	2500
Maquina de café	1200
MLL	800
MLR	900
Ferro de engomar	1250
Forno	2500
Exaustor	1200
Micro-ondas	100
Aspirador	1250
Televisão	90
Sistema de som	20
Computador	250
Impressora	90
Secador	300
Frigorífico	140
Torradeira	500
<b>Total</b>	<b>13090</b>

Nesta secção são definidos a utilização dos equipamentos, através do limite “Percentagem”, para depois serem contabilizados nos ganhos internos pelos equipamentos elétricos.

No quadro 4.1 apresentam-se os equipamentos utilizados, e o seu consumo por hora.

Após a definição dos equipamentos do edifício, foi estimado o número de horas de utilização por dia de cada um, e por fim a percentagem de utilização tendo em conta o número de Watts total. Estes valores estão representados no quadro 4.2 e no quadro 4.3.

*Quadro 4.2 – Consumo diário dos equipamentos elétricos*

Equipamentos	Horas/dia	Watts/dia
Placa elétrica	0,50	1250
Maquina de café	0,17	204
MLL	0,57	456
MLR	0,43	387
Ferro de engomar	0,43	537,5
Forno	0,43	1075
Exaustor	0,50	600
Micro-ondas	0,14	140
Aspirador	0,43	537,5
Televisão	4,00	360
Sistema de som	1,00	30
Computador	3,00	750
Impressora	1,00	90
Secador	0,17	51
Frigorifico	1,00	140
Torradeira	0,17	85

#### 4.5.2.6 Temperatura

*Quadro 4.3 - Consumo diário dos equipamentos elétricos*

Horário	Ocupação (%)	Equipamentos (W)	Percentagem de utilização
7h-8h	100	755	6%
8h-13h	0	140	1%
13h-14h	75	1045	8%
14h-17h	0	140	1%
17h-18h	75	990	8%
18h-21h	100	2000	15%
21h-24h	100	1713	13%

O *schedule* “Temperatura” define a temperatura interior presente do edifício durante todo o dia. Este parâmetro divide-se em dois, de modo a definir a temperatura mínima (“Temperatura min”), e a temperatura máxima (“Temperatura máx”) do interior do edifício. Sendo assim, baseado em temperaturas *standard* de conforto, foi definido um mínimo de 18 °C e um máximo de 24 °C para todo o ano.

#### 4.5.2.7 Humidade Relativa

Em “Humidade Relativa”, à semelhança do *schedule* “Temperatura”, este parâmetro foi dividido em dois, de modo a definir a humidade relativa min (“Humidade min”) e a humidade relativa máxima (“Humidade máx”) no interior do edifício. Assim, foi definido para todo o ano, e para todo o dia, um valor máximo de 65% e um valor mínimo de 50 %.

#### 4.5.2.8 A/C

O último *schedule* definido, denominado “A/C”, diz respeito a utilização do controlo do ar condicionado, tendo sido utilizado para esse efeito o limite “Controlo” e o valor de 4.

Este parâmetro será detalhado posteriormente.

### 4.6 Elementos de construção da envolvente

Este campo permite definir as soluções construtivas do edifício a simular. Para isso são introduzidos os materiais constituintes de cada solução e as soluções, com exceção dos materiais utilizados nos vãos envidraçados.

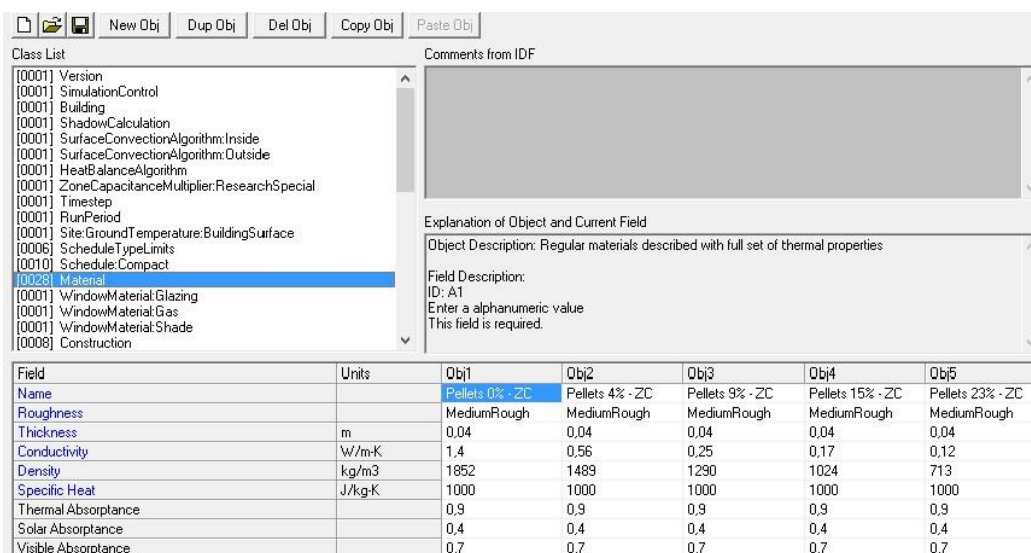
#### 4.6.1 Material

Primeiramente é necessário introduzir os materiais constituintes de cada solução construtiva e as suas características.

Na figura 4.10 temos alguns dos materiais definidos na presente dissertação.

Para cada material introduzido, foi necessário definir um nome, a rugosidade, a espessura, a condutibilidade térmica, o volume e o calor específico.

No caso das argamassas com várias percentagens de pellets de madeira e argamassas para reboco de cal hidráulica, as suas propriedades, foram determinadas experimentalmente. Isto deveu-se a não existirem dados concretos de algumas propriedades para argamassas de cal hidráulica com pellets de madeira, tendo constituído um dos pontos mais importantes deste trabalho. Na secção 5.7 descreve-se detalhadamente todos os processos experimentais realizados, para a obtenção destes valores.



Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Name		Pellets 0% - ZC	Pellets 4% - ZC	Pellets 9% - ZC	Pellets 15% - ZC	Pellets 23% - ZC
Roughness		MediumRough	MediumRough	MediumRough	MediumRough	MediumRough
Thickness	m	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Conductivity	W/m-K	1,4	0,56	0,25	0,17	0,12
Density	kg/m3	1852	1489	1290	1024	713
Specific Heat	J/kg-K	1000	1000	1000	1000	1000
Thermal Absorptance		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Solar Absorptance		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Visible Absorptance		0,7	0,7	0,7	0,7	0,7

Figura 4.10 - Materiais



## 4.6.2 Material de Janela : Vidros

Nesta secção são introduzidas as folhas de vidros que vão ser utilizadas para os vãos envidraçados e as suas características. Na figura 4.11, apresenta-se a folha vidro utilizada nas simulações efetuadas. O *Energy Plus* permite definir bastantes características para os vidros, sendo as mais relevantes a sua espessura, a condutibilidade térmica, emissividade e refletividade.

Field	Units	Obj1
Name		Vidro Simples 6MM
Optical Data Type		SpectralAverage
Window Glass Spectral Data Set Name		
Thickness	m	0.006
Solar Transmittance at Normal Incidence		0.775
Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0.071
Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0.071
Visible Transmittance at Normal Incidence		0.881
Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0.08
Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0.08
Infrared Transmittance at Normal Incidence		0
Front Side Infrared Hemispherical Emissivity		0.84
Back Side Infrared Hemispherical Emissivity		0.84
Conductivity	W/m-K	0.9
Dirt Correction Factor for Solar and Visible Transmittance		
Solar Diffusing		
Young's modulus	Pa	
Poisson's ratio		

Figura 4.11 - Vidros

## 4.6.3 Material de Janela: Gás

Em "Gas" é definido o tipo de gás utilizado no interior dos vãos envidraçados (para o caso de vidros duplos), sendo necessário definir o gás utilizado (ar, árgon, krípton, etc..) e a sua espessura.



Na figura 4.12 apresenta-se o gás utilizado nos vãos envidraçados.

Field	Units	Obj1
Name		Espaço de ar (12 mm)
Gas Type		Air
Thickness	m	0,012
Conductivity Coefficient A	W/m-K	
Conductivity Coefficient B	W/m-K2	
Conductivity Coefficient C	W/m-K3	
Viscosity Coefficient A	kg/m-s	
Viscosity Coefficient B	kg/m-s-K	
Viscosity Coefficient C	kg/m-s-K2	
Specific Heat Coefficient A	J/kg-K	
Specific Heat Coefficient B	J/kg-K2	
Specific Heat Coefficient C	J/kg-K3	
Molecular Weight	g/mol	
Specific Heat Ratio		

Figura 4.12 – Window material: gas

#### 4.6.4 Material de Janela: Shade

Em “Shade” são definidas as proteções solares dos vãos envidraçados e as suas características.

Nas simulações efetuadas utilizaram-se persianas de réguas plásticas, conforme se pode observar na figura 4.13.

Field	Units	Obj1
Name		Persianas de Réguas Plásticas
Solar Transmittance	dimensionless	0,4
Solar Reflectance	dimensionless	0,2
Visible Transmittance	dimensionless	0,4
Visible Reflectance	dimensionless	0,2
Infrared Hemispherical Emissivity	dimensionless	0,9
Infrared Transmittance	dimensionless	0
Thickness	m	0,005
Conductivity	W/m-K	0,1
Shade to Glass Distance	m	0,05
Top Opening Multiplier		0,5
Bottom Opening Multiplier		0,5
Left-Side Opening Multiplier		0,5
Right-Side Opening Multiplier		0,5
Airflow Permeability	dimensionless	0

Figura 4.13 – Sombreamento das janelas

#### 4.6.5 Construção

Por fim, nesta secção são definidas todas as soluções construtivas a utilizar nas simulações, constituídas pelos materiais definidos anteriormente.

As soluções construtivas adotadas para a solução base estão representadas nos quadros 4.4,4.5,4.6,4.7,4.8,4.9. As restantes soluções construtivas, encontram-se no anexo A1.

Quadro 4.4 - Solução base – Envolvente Exterior – Zona Corrente

Paredes Exteriores - Zona Corrente					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U (W/(m².°C))
Estuque Interior	0,04	0,43	0,09	0,81	1,2
Tijolo Cerâmico	0,22	-	0,52		
Reboco Exterior - Corrente	0,04	1,4	0,03		
Total	0,3	-	-		

Quadro 4.5 - Solução base – Envolvente Exterior – Ponte Térmica Plana

Paredes Exteriores - Ponte Térmica Plana					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U (W/(m².°C))
Estuque Interior	0,01	0,43	0,02	0,35	2,9
Betão Armado	0,25	2,00	0,13		
Reboco Exterior - Corrente	0,04	1,4	0,03		
Total	0,3	-	-		

Quadro 4.6 - Solução base - Laje Intermédia

Laje Intermédia					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U (W/(m².°C))
Ladrinho Cerâmico	0,03	0,41	0,07	0,27	3,7
Betonilha de Regularização	0,04	1,30	0,03		
Betão Armado	0,20	2,00	0,10		
Estuque Interior	0,03	0,43	0,07		
Total	0,30	-	-		

Quadro 4.4 - Solução base - Paredes Interiores

Paredes Interiores					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U (W/(m².°C))
Estuque Interior	0,02	0,43	0,05	0,54	1,9
Tijolo Cerâmico	0,11	-	0,27		
Estuque Interior	0,02	0,43	0,27		
Total	0,15	-	-		

Quadro 4.5 - Solução base - Cobertura Plana

Cobertura não transitável ( apenas manutenção)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U (W/(m².°C))
Estuque Interior	0,03	0,43	0,07	0,55	1,8
Betão	0,20	2,00	0,10		
Camada de Forma	0,10	0,46	0,22		
Sistema de Impermeabilização	-	-	-		
Manta Geotextil	-	-	-		
Seixo Rolado	0,05	2,00	0,03		
Total	0,38	-	-		

Quadro 4.6 - Solução base - Pavimento

Pavimento					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U (W/(m².°C))
Ladrilho Cerâmico	0,02	0,41	0,05	0,45	2,2
Camada de Enchimento - Betonilha Leve	0,04	0,70	0,06		
XPS	0,04	0,04	0,10		
Betão Armado	0,20	2,00	0,10		
Total	0,30	-	-		

Para a definição das soluções construtivas no programa apenas foi necessário introduzir os elementos que contribuem para a contabilização do coeficiente de transmissão térmica (U). A introdução dos materiais é feita começando na camada mais exterior até à camada mais interior.

Na figura 4.14 está representada a introdução das soluções construtivas, para a solução base, no *Energy Plus*.

## 4.7 Zonas Térmicas e Envolvente

Este grupo do *Energy Plus* diz respeito a parâmetros geométricos de construção do edifício (paredes, pavimentos, coberturas, portas e vãos envidraçados).

### 4.7.1 Regras geométricas globais

Neste campo define-se as regras para a definição geométrica dos vértices das superfícies.

Class List

- [0001] Version
- [0001] SimulationControl
- [0001] Building
- [0001] ShadowCalculation
- [0001] SurfaceConvectionAlgorithm:Inside
- [0001] SurfaceConvectionAlgorithm:Outside
- [0001] HeatBalanceAlgorithm
- [0001] ZoneCapacityMultiplier:ResearchSpecial
- [0001] Timestep
- [0001] RunPeriod
- [0001] Site:GroundTemperature:BuildingSurface
- [0006] ScheduleTypeLimits
- [0010] Schedule:Compact
- [0028] Material
- [0001] WindowMaterial:Glazing
- [0001] WindowMaterial:Gas
- [0001] WindowMaterial:Shade
- [0005] Construction

Comments from IDF

Explanation of Object and Current Field

Object Description: Start with outside layer and work your way to the inside layer  
Up to 10 layers total, 8 for windows  
Enter the material name for each layer

Field Description:  
ID: A:1  
Enter a alphanumeric value

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8
Name		Paredes Exteriores - Zona Corrente	Paredes Exteriores - Ponte Térmica Plana	Paredes Interiores	Laje Intermédia	Vão Envidraçado	Pavimento	Viga	Cobertura
Outside Layer		Pellets 0% - ZC	Pellets 0% - ZC	Estuque 2 cm	Ladrilho Cerâmico 3 cm	Vidro Simples 6MM	Betão Armado 20 cr	Pellets 0% - PTP	Seixo Rolado
Layer 2		Tijolo 22 cm	Betão Armado 25 cm	Tijolo 11 cm	Betonilha de regularização	Espaço de ar 12 mm	XPS 4 cm	Betão Armado 25 cr	Camada de Forma
Layer 3		Estuque Interior 4cm	Estuque 1 cm	Estuque 2 cm	Betão Armado 20 cm	Vidro Simples 6MM	Enchimento - Beton	Estuque 1 cm	Betão Armado 20 cm
Layer 4					Estuque Interior 3 cm		Ladrilho Cerâmico 2		Estuque Interior 3 cm
Layer 5									
Layer 6									
Layer 7									
Layer 8									
Layer 9									
Layer 10									

Figura 4.14 - Construção

Foi definida então a posição inicial como sendo o canto inferior esquerdo de cada superfície, e os restantes, determinados a partir do primeiro, seguem o sentido contrário aos ponteiros do relógio. A elaboração da geometria foi realizada optando por um desenvolvimento linear exterior.

O sistema de coordenadas foi definido como sendo relativo, de modo a que as coordenadas sejam colocadas relativamente a cada zona.

## 4.7.2 Zona

Em “Zone” são definidas as diferentes zonas térmicas existentes no edifício. É necessário para tal efeito, introduzir os seus nomes, a posição do sistema de coordenadas, o ângulo que a zona faz com norte e sendo ainda necessário introduzir o volume e área de cada zona. No trabalho desenvolvido, foi definida uma única zona, com um ângulo de 0° relativos ao Norte, com a origem dos eixos em 0 e a opção de cálculo da área e de volume pelo *Energy Plus*. Estes valores podem ser observados na figura 4.15.

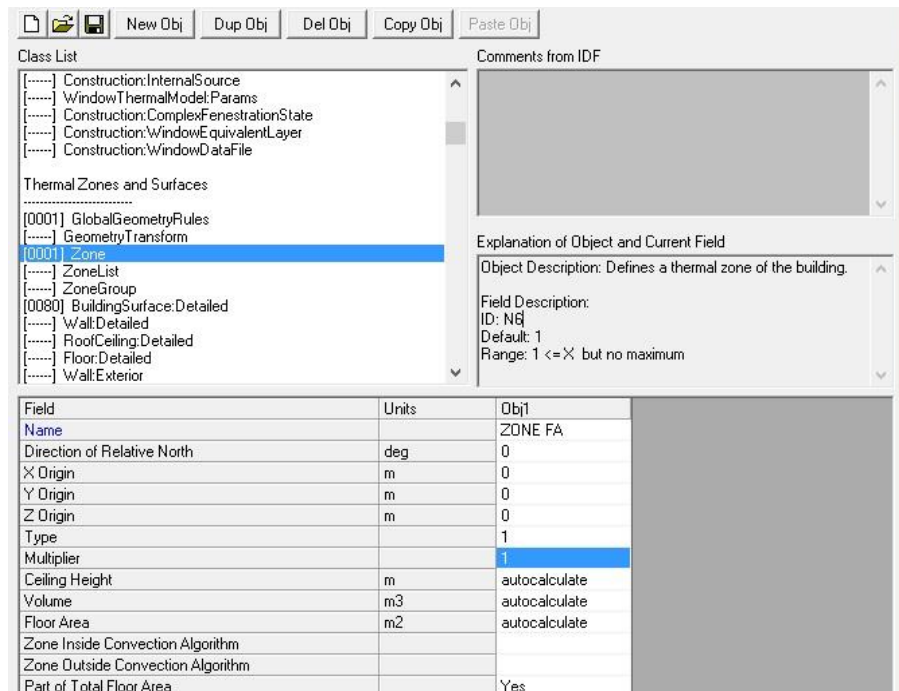


Figura 4.15 - Zone

## 4.7.3 Superfície do Edifício: Detalhada

Na figura 4.16 está representado o modelo realizado com recurso ao *Energy Plus*.

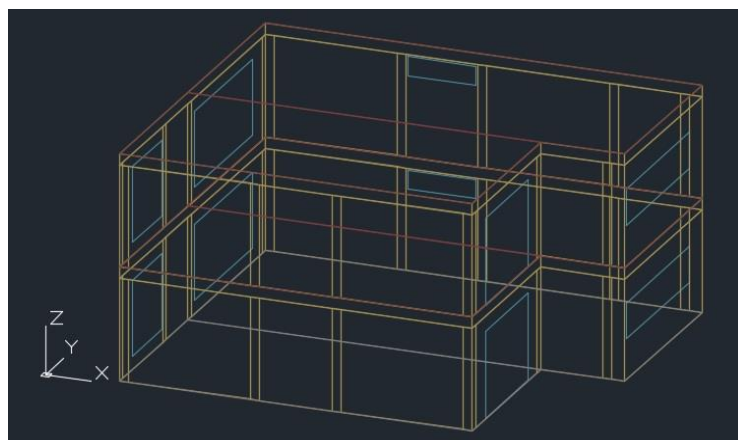


Figura 4.16 - Modelo realizado através do Energy Plus

Tendo em conta as regras para a elaboração da geometria, definidas anteriormente, neste campo são definidas as envolventes exteriores de cada zona. Nessa definição é necessária dar um

nome ao elemento a definir (não podendo existir nomes repetidos), escolher o tipo de superfície (parede, pavimento, teto ou cobertura), a solução construtiva do elemento, a zona em que o elemento está inserido, condição de fronteira que o elemento possui (exterior, interior, superfície, terreno, etc.) e por fim, a exposição ao sol e ao vento.

Após definição das características referidas introduz-se o número de vértices que se vai utilizar (de um modo geral, utilizam-se 4 vértices) e as coordenadas desses vértices.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9
Name		P1	Parede A	P2	Parede B	P3	Parede C	P4	P4.2	Parede D
Surface Type		Wall	Wall	Wall	Wall	Wall	Wall	Wall	Wall	Wall
Construction Name		Paredes Exteriores	Paredes Exteriores	Paredes Exteriores	Paredes Exteriores	Paredes Exteriores	Paredes Exteriores	Paredes Exteriores	Paredes Exteriores	Paredes Exteriores
Zone Name		ZONE FA	ZONE FA	ZONE FA	ZONE FA	ZONE FA	ZONE FA	ZONE FA	ZONE FA	ZONE FA
Outside Boundary Condition		Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors	Outdoors
Outside Boundary Condition Object										
Sun Exposure		SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed	SunExposed
Wind Exposure		WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed	WindExposed
View Factor to Ground		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Number of Vertices		4	4	4	4	4	4	4	4	4
Vertex 1 X-coordinate	m	1.95	2.2	5.65	5.9	7.95	8.2	11.65	11.9	11.9
Vertex 1 Y-coordinate	m	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.55
Vertex 1 Z-coordinate	m	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vertex 2 X-coordinate	m	2.2	5.65	5.9	7.95	8.2	11.65	11.9	11.9	11.9
Vertex 2 Y-coordinate	m	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.55	4.9
Vertex 2 Z-coordinate	m	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vertex 3 X-coordinate	m	2.2	5.65	5.9	7.95	8.2	11.65	11.9	11.9	11.9
Vertex 3 Y-coordinate	m	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.55	4.9
Vertex 3 Z-coordinate	m	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
Vertex 4 X-coordinate	m	1.95	2.2	5.65	5.9	7.95	8.2	11.65	11.9	11.9
Vertex 4 Y-coordinate	m	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.55
Vertex 4 Z-coordinate	m	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7

Figura 4.17 – Superfícies do Edifício detalhadas

No total foram introduzidos 80 elementos para a constituição do modelo efetuado, o que implicou a introdução de 320 coordenadas. Apesar de constituir um processo bastante moroso e cuidadoso, é de extrema importância realizar uma cuidadosa introdução dos pontos, de maneira a realizar uma correta simulação.

Na figura 4.17 podemos observar a definição geométrica de alguns elementos.

#### 4.7.4 Fenestração: Detalhada

À semelhança do campo referido anteriormente, nesta secção são definidas a posição geométrica das janelas, portas e portas de vidro. É definido o tipo de superfície, a solução construtiva do elemento e o elemento construtivo onde se encontram inseridos (definido anteriormente). Para além destas características é possível introduzir um controlo de sombreamento e uma caixilharia (no caso dos vidros), sendo estes parâmetros abordados posteriormente.

Por fim é introduzido o número de vértices a utilizar, e as coordenadas dos mesmos.

No trabalho elaborado, apenas se optou pela definição de 10 vãos envidraçados. As portas não foram contabilizadas.

Na figura 4.18 observam-se os vãos envidraçados introduzidos no modelo estudado.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9	Obj10
Name		V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
Surface Type		Window	Window	Window	Window	Window	Window	Window	Window	Window	Window
Construction Name		Vão Envidraçado	Vão Envidraçado	Vão Envidraçado	Vão Envidraçado	Vão Envidraçado	Vão Envidraçado	Vão Envidraçado	Vão Envidraçado	Vão Envidraçado	Vão Envidraçado
Building Surface Name		Parede D	Parede F	Parede I	Parede K	Parede M	Parede S	Parede U	Parede X	Parede Z	Parede AC
Outside Boundary Condition Object											
View Factor to Ground		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Shading Control Name		Activação dos Disp	Activação dos Disp	Activação dos Disp	Activação dos Disp	Activação dos Disp	Activação dos Disp	Activação dos Disp	Activação dos Disp	Activação dos Disp	Activação dos Disp
Frame and Divider Name		Caixilharia	Caixilharia	Caixilharia	Caixilharia	Caixilharia	Caixilharia	Caixilharia	Caixilharia	Caixilharia	Caixilharia
Multiplier		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Number of Vertices		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Vertex 1 X-coordinate	m	11,9	14,28	7,88	1,95	1,95	11,9	14,28	7,88	1,95	1,95
Vertex 1 Y-coordinate	m	1,23	5,23	10,65	9,73	3,3	1,23	5,23	10,65	9,73	3,3
Vertex 1 Z-coordinate	m	0	1,1	2,15	0,35	0,35	3	4,1	5,15	3,35	3,35
Vertex 2 X-coordinate	m	11,9	14,28	5,98	1,95	1,95	11,9	14,28	5,98	1,95	1,95
Vertex 2 Y-coordinate	m	4,28	9,73	10,65	5,63	1,23	4,28	9,73	10,65	5,63	1,23
Vertex 2 Z-coordinate	m	0	1,1	2,15	0,35	0,35	3	4,1	5,15	3,35	3,35
Vertex 3 X-coordinate	m	11,9	14,28	5,98	1,95	1,95	11,9	14,28	5,98	1,95	1,95
Vertex 3 Y-coordinate	m	4,28	9,73	10,65	5,63	1,23	4,28	9,73	10,65	5,63	1,23
Vertex 3 Z-coordinate	m	2,3	2,05	2,65	2,35	2,35	5,3	5,05	5,65	5,35	5,35
Vertex 4 X-coordinate	m	11,9	14,28	7,88	1,95	1,95	11,9	14,28	7,88	1,95	1,95
Vertex 4 Y-coordinate	m	1,23	5,23	10,65	9,73	3,3	1,23	5,23	10,65	9,73	3,3
Vertex 4 Z-coordinate	m	2,3	2,05	2,65	2,35	2,35	5,3	5,05	5,65	5,35	5,35

Figura 4.18 - Vãos envidraçados

#### 4.7.5 Propriedades da janela: Controlo de sombreamento

Em “*Shading Control*” é permitido ao utilizador definir um período para ativação dos elementos de proteção.

É possível definir o tempo de proteção, o mecanismo de ativação e associar um material (para as proteções), que já tenha sido definido anteriormente.

Assim, foi definido a ativação das persianas de réguas plásticas quando a temperatura do interior da zona exceder os 25°C.

Esta proteção é depois associada aos vãos envidraçados em “Fenestration Surface : Detailed”.

#### 4.7.6 Propriedades da janela: Caixilho e divisor

Neste campo é possível definir uma caixilharia para depois ser associada aos vãos envidraçados em “Fenestration Surface : Detailed”.

Utilizou-se uma largura, da periferia para o interior do vão, de 10 cm com o coeficiente de transmissão térmica, U, de 2 W/(m<sup>2</sup>.°C), representando uma caixilharia em PVC.

#### 4.7.7 Massa Interna

De modo a facilitar o processo de definição do modelo a estudar, o *Energy Plus* permite a simplificação do interior do edifício. Usando o campo “Internal Mass” não é necessário ao utilizador introduzir detalhadamente as paredes interiores das zonas definidas, apenas é necessário introduzir a área (das superfícies) e a solução construtiva associada a estas paredes. A partir destes valores o programa realiza o cálculo da massa interna.

Na figura 4.19, está representado o campo *Internal Mass*, utilizado neste trabalho.

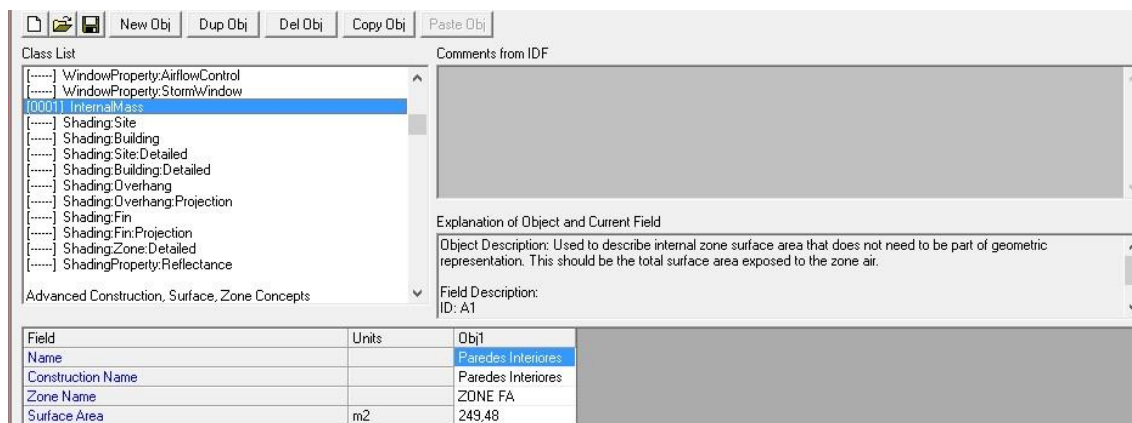


Figura 4.19 – Massa Interna

## 4.8 Ganhos internos e renovação do ar

Utilizando a secção “*Internal Gains*” é possível definir os ganhos internos de cada zona térmica. Os ganhos internos mais correntes, utilizados neste trabalho, foram os ganhos associados à ocupação por pessoas, à iluminação e devido aos equipamentos elétricos.

Relativamente às renovações do ar, o *Energy Plus* permite introduzir os dados associados à renovação do ar interior de cada zona térmica devido às trocas do ar interior com o ar exterior.

### 4.8.1 Pessoas

Em “People” são introduzidos os ganhos relativos ao calor produzido pelos habitantes do edifício, provenientes do seu metabolismo. Neste trabalho foram arbitradas 4 pessoas para habitar o edifício.

Um dos valores com elevada importância a definir é a fração radiante que caracteriza o tipo de calor emitido pelas pessoas na zona.

Segundo (Fernandes,2011) a utilização de um valor 0,6 para a fração radiante constitui um valor padrão pra a perda de calor de pessoas que realizam poucos movimentos, sem exposição de vento.

O valor de 0,7 indica que 70 % do calor libertado pelos utilizadores será sobre a forma de radiação, pelo que constitui um valor adequado para a simulação em questão.



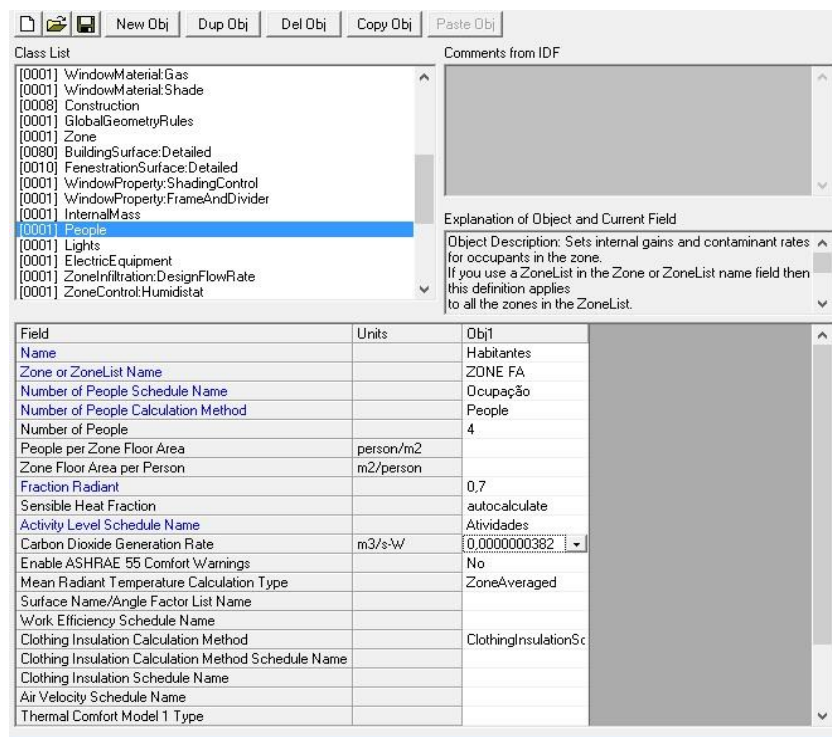


Figura 4.20 - Pessoas

Foi associado o *schedule* “Ocupação”, de modo a permitir ao *Energy Plus* ter a informação acerca dos horários e quantidade de pessoas que existem na fração, ou seja, o horário no qual vai ocorrer produção de calor pelas pessoas.

Associa-se ainda o *schedule* “Actividade” para definir a quantidade de calor que é produzida pelos habitantes, tendo sido arbitrado o valor médio de 100W/pessoa.

Na figura 4.20 é possível observar o campo “People” definido na presente dissertação.

## 4.8.2 Lights

Neste parâmetro definimos os ganhos internos devido à iluminação da fração autónoma.

Inserindo o *schedule* “Iluminação” que foi definido anteriormente, o programa irá contabilizar os horários em que vão ser contabilizados os ganhos devido à iluminação. É necessário definir as unidades que vão ser utilizadas nesta contabilização e o seu valor. Nas simulações efetuadas as unidades adotadas foram Watts/Área, utilizando o valor médio de 5 W/m<sup>2</sup>.

O programa necessita ainda de informação acerca da fração de energia que é perdida sob a forma de radiação e convecção. Consultando o documento *Input-Output Reference* (U.S. Department of Energy, 2016) é possível obter estes dados, que variam consoante o tipo de lâmpada adotada.

As lâmpadas adotadas foram do tipo suspensas, pelo que se introduziram os valores correspondentes a esse género de iluminação.

Na figura 4.21, mostra-se as opções utilizadas para os ganhos por iluminação.



Field	Units	Obj1
Name		Iluminação
Zone or ZoneList Name		ZONE FA
Schedule Name		Iluminação
Design Level Calculation Method		Watts/Area
Lighting Level	W	
Watts per Zone Floor Area	W/m2	5
Watts per Person	W/person	
Return Air Fraction		0
Fraction Radiant		0.42
Fraction Visible		0.18
Fraction Replaceable		1
End-Use Subcategory		General
Return Air Fraction Calculated from Plenum Temperature		No
Return Air Fraction Function of Plenum Temperature Co		
Return Air Fraction Function of Plenum Temperature Co 1/K		

Figura 4.21 - Luzes

### 4.8.3 Equipamentos elétricos

À semelhança do parâmetro “*Lights*” que define os ganhos internos pela iluminação da habitação, o parâmetro “*Electric Equipment*” define os ganhos internos derivados dos equipamentos elétricos.

Na secção 4.5.2.5 foram definidos os equipamentos elétricos e a sua percentagem de utilização consoante as horas do dia.

Utilizando estes *schedule* nesta secção, é possível para o *Energy Plus* realizar a contabilização

Field	Units	Obj1
Name		Equipamentos Eléctricos
Zone or ZoneList Name		ZONE FA
Schedule Name		Equipamentos
Design Level Calculation Method		Watts/Area
Design Level	W	
Watts per Zone Floor Area	W/m2	112
Watts per Person	W/person	
Fraction Latent		0
Fraction Radiant		0.3
Fraction Lost		0
End-Use Subcategory		General

Figura 4.22 – Equipamentos elétricos

dos ganhos internos provenientes dos equipamentos elétricos, consoante a sua utilização durante o dia.

A unidade utilizada nesta contabilização foi Watts/área e foi utilizado o valor de 112W/m<sup>2</sup>.

Definiu-se ainda que todo o calor gerado pelos equipamentos é levado em consideração na zona (*Fraction Lost* = 0) e que 30 % do calor gerado será sobre a forma de radiação (*Fraction Radiant* = 0,3).

Na figura 4.22 apresentam-se as opções utilizadas para os ganhos por equipamentos elétricos.

#### 4.8.4 Infiltração da zona: taxa de circulação do ar

Nesta secção é possível inserir informações relativas a troca de ar que ocorrem dentro de cada zona.

O *Energy Plus* permite a definição de trocas de ar distintas para zonas térmicas distintas, o que não constitui o caso deste trabalho, tendo sido adotada apenas uma zona com os mesmos parâmetros de renovações de ar.

Na secção 4.5.2.2 foi definido o *schedule* “Ventilação”, que fornece informações acerca do horário de utilização da ventilação mecânica da fração, sendo necessário associar este horário de modo a definir as trocas de ar.

Por fim, à semelhança dos parâmetros anteriores, é necessário definir as unidades e o valor das renovações de ar. Foi definido um valor constante 0,6 renovações de ar por hora.

Na figura 4.23 encontram-se as informações relativas a esta secção.

Field	Units	Obj1
Name		Infiltração
Zone or ZoneList Name		ZONE FA
Schedule Name		Ventilação
Design Flow Rate Calculation Method		AirChanges/Hour
Design Flow Rate	m3/s	
Flow per Zone Floor Area	m3/s-m2	
Flow per Exterior Surface Area	m3/s-m2	
Air Changes per Hour	1/hr	0,6
Constant Term Coefficient		1
Temperature Term Coefficient		0
Velocity Term Coefficient		0
Velocity Squared Term Coefficient		0

Figura 4.23 – Taxa de circulação do ar

## 4.9 Controlo de AVAC e termóstatos

Nesta secção são apresentados os parâmetros que vão realizar o controlo térmico da fração autónoma.

### 4.9.1 Controlo da zona: Humidade

Neste parâmetro é definido um equipamento fictício para o controlo de humidade relativa da habitação. Indica-se para isso, a zona térmica onde o equipamento vai atuar e associam-se os *schedules* definidos anteriormente “Humidade min” e “Humidade máxi” de modo a serem garantidos os valores mínimos e máximos de humidade relativa.

Na figura 4.24 apresenta-se o parâmetro de controlo de humidade relativa que foi definido.

Field	Units	Obj1
Name		Controlo RH
Zone Name		ZONE FA
Humidifying Relative Humidity Setpoint Schedule Name		Humidade min
Dehumidifying Relative Humidity Setpoint Schedule Name		Humidade máxi

Figura 4.24 – Controlo de humidade

#### 4.9.2 Termostato: *setpoint* duplo

Em “*Thermostat Setpoint : Dual Setpoint*” define-se um termostato com dois *setpoints* de modo a ser usado para aquecimento e arrefecimento.

Associam-se para isso os *schedules* “Temperatura min” e “Temperatura máx” aos *setpoints* de aquecimento e de arrefecimento, respetivamente.

Na figura 4.25 apresenta-se os *setpoints* para o termostato que foi definido.

Field	Units	Obj1
Name		Temp
Heating Setpoint Temperature Schedule Name		Temperatura min
Cooling Setpoint Temperature Schedule Name		Temperatura máx

Figura 4.25 – Termostato *setpoints*

#### 4.9.3 Controlo da zona: Termostato

À semelhança do referido para “*Zone Control: Humidistat*”, nesta secção define-se o controlo de temperatura da habitação.

Para isso associam-se os *setpoints* referidos anteriormente e o *schedule* “A/C” que tem associado o limite “Controlo” com o valor de 4.

Field	Units	Obj1
Name		Controlo Temperatura
Zone or ZoneList Name		ZONE FA
Control Type Schedule Name		A/C
Control 1 Object Type		ThermostatSetpoint: DualSetpoint
Control 1 Name		Temp
Control 2 Object Type		
Control 2 Name		
Control 3 Object Type		
Control 3 Name		
Control 4 Object Type		
Control 4 Name		

Figura 4.26 - Controlo Temperatura

O valor “4” representa uma de cinco situações possíveis, referindo-se a um controlo de aquecimento e arrefecimento (de modo a estar de acordo com os setpoints definidos anteriormente).

Na figura 4.26 apresenta-se o termóstato definido.

## 4.10 Unidades de ar impostas no AVAC

Nesta secção são definidos os parâmetros do equipamento fictício utilizado para aquecimento e arrefecimento da zona. O equipamento é fictício porque permite manter os limites de temperatura sem ganhos internos e 100% de eficiência.

Na figura 4.27, apresenta-se o equipamento fictício definido.

Field	Units	Obj1
Name		A/C ficticio
Availability Schedule Name		A/C
Zone Supply Air Node Name		N01
Zone Exhaust Air Node Name		N04
Maximum Heating Supply Air Temperature	C	50
Minimum Cooling Supply Air Temperature	C	13
Maximum Heating Supply Air Humidity Ratio	kgWater/kgDryA	0.0156
Minimum Cooling Supply Air Humidity Ratio	kgWater/kgDryA	0.0077
Heating Limit		NoLimit
Maximum Heating Air Flow Rate	m3/s	
Maximum Sensible Heating Capacity	W	
Cooling Limit		NoLimit
Maximum Cooling Air Flow Rate	m3/s	
Maximum Total Cooling Capacity	W	
Heating Availability Schedule Name		
Cooling Availability Schedule Name		
Dehumidification Control Type		ConstantSensibleHe
Cooling Sensible Heat Ratio	dimensionless	
Humidification Control Type		None
Design Specification Outdoor Air Object Name		
Outdoor Air Inlet Node Name		

Figura 4.27 - Equipamento fictício

## 4.11 Conexões do equipamento de AVAC

### 4.11.1 Zona HVAC: Lista de equipamentos

Esta secção está relacionada com a anterior, definindo os equipamentos existentes na zona térmica e as suas ligações.

Na figura 4.28 apresenta-se a lista de equipamentos definida.

Field	Units	Obj1
Name		Equipamento Ficticio
Zone Equipment 1 Object Type		ZoneHVAC:IdealLoadsAirSystem
Zone Equipment 1 Name		A/C ficticio
Zone Equipment 1 Cooling Sequence		1
Zone Equipment 1 Heating or No-Load Sequence		1

Figura 4.28 – Lista de equipamentos

#### 4.11.2 Zona HVAC: Conexões

Este parâmetro define as conexões dos equipamentos. São definidos vários nós associados aos vários modos de funcionamento do equipamento.

Na figura 4.29, estão representadas as conexões utilizadas neste trabalho.

Field	Units	Obj1
Zone Name		ZONE FA
Zone Conditioning Equipment List Name		Equipamento Ficticio
Zone Air Inlet Node or NodeList Name		N01
Zone Air Exhaust Node or NodeList Name		N04
Zone Air Node Name		N02
Zone Return Air Node Name		N03
Zone Return Air Flow Rate Fraction Schedule Name		
Zone Return Air Flow Rate Basis Node or NodeList Name		

Figura 4.29 – Conexões dos equipamentos

#### 4.12 Relatórios de simulação

A última secção retratada, diz respeito às variáveis de resultados da simulação. Recorrendo ao campo *Output: Variable* é possível escolher (de entre uma vasta lista de opções) a variável pretendida com base nos objetivos do trabalho realizado.

Para simulações mais detalhadas é necessária a introdução de variáveis avançadas, recorrendo para isso à secção “*Output: Diagnostics*”.

A lista de variáveis é muito extensa, pelo que é recomendada a leitura do documento *Input Output Reference* (U.S. Department of Energy 2016), onde se encontram explicadas as variáveis de resultados.

As variáveis de resultados utilizadas na presente dissertação podem ser observadas no quadro 4.10.

Quadro 4.7 - Variáveis utilizadas nas simulações

Variável utilizada	Resultado
Zone Ideal Loads Air Total Heating Energy	Necessidades energéticas de aquecimento
Zone Ideal Loads Air Total Cooling Energy	Necessidades energéticas de arrefecimento
Zone Surface Inside Face Conduction Heat Loss Rate	Perdas térmicas referentes à condução de calor pela envolvente opaca
Zone Window Heat Loss Energy	Perdas térmicas associados aos vãos envidraçados
Zone Mean Air Temperature	Temperatura média do ar no interior da zona
Outdoor Dry Bulb	Temperatura de bolbo seco exterior
Zone Air Relative Humidity	Humidade relativa do interior
Surface Inside Face Temperature	Temperatura superficial interior das superfícies
Surface Outside Face Temperature	Temperatura superficial exterior das superfícies
Site Outdoor Air Relative Humidity	Humidade relativa exterior



## 5 Caracterização Experimental

### 5.1 Considerações iniciais

A presente dissertação tem como objetivo principal efetuar uma modelação energética de um edifício residencial com recurso ao Energy Plus, utilizando uma argamassa com desempenho térmico melhorado, possuindo pellets de madeira. Devido a utilização de argamassas com composições diferentes das já estudadas, a nível do ligante e da dosagem dos agregados, foi necessário realizar uma campanha experimental de modo a avaliar o comportamento destas novas misturas.

Como tal, neste capítulo serão descritas todas as fases inerentes à caracterização das argamassas. A primeira fase consiste na seleção e descrição dos materiais utilizados na produção das argamassas.

Em seguida, serão descritos os métodos de preparação das argamassas e os ensaios preliminares.

Na última fase são enunciados os ensaios realizados às argamassas de modo a aferir as características físicas necessárias para a sua utilização no *Energy Plus*.

Com objetivo de aferir o comportamento argamassas de desempenho térmico melhorado, foram produzidas cinco argamassas tradicionais à base de cal hidráulica, sendo que em quatro dessas argamassas foram incorporadas várias percentagens de pellets de madeira. Foi produzida também uma argamassa tradicional à base de cal hidráulica, sem qualquer percentagem de pellets, de modo a funcionar como argamassa de referência e permitir obter resultados comparativos.

Na produção das argamassas com pellets de madeira optou-se pela substituição, em massa, de 4%, 9%, 15%, 23%, em relação à areia. Estas percentagens surgem devido à substituição das areias APAS 12 e APAS 20 em 20 %, 40%, 60%, 80% por pellets de madeira, que analisada globalmente em relação ao agregado, dá origem aos valores de 4, 9, 15 e 23. Não se optou pela substituição de maiores percentagens devido a argamassa perder integridade, não sendo possível a sua aplicação e utilização para os ensaios.

Inicialmente, de modo a determinar as características dos materiais constituintes das argamassas, foram determinadas as suas baridades, nomeadamente, das areias utilizadas, dos pellets de madeira e da cal hidráulica.

Por fim procede-se a determinação das características físicas das diferentes misturas de argamassa. Para esse efeito foram realizados ensaios à argamassa no estado fresco, ensaio de consistência por espalhamento, e ensaios no estado endurecido, massa volúmica geométrica, condutibilidade térmica, porosidade aberta, absorção de água por capilaridade e secagem.

### 5.2 Materiais da argamassa

O Ligante utilizado na produção das argamassas foi uma Cal Hidráulica, HL 5.

Esta cal hidráulica foi produzida pela *Secil*, constituída por silicatos e aluminatos de cálcio e hidróxido de cálcio, obtida por cozedura de calcário margoso, seguida de moagem. Além de apresentar presa



hidráulica, este ligante tem a peculiaridade de apresentar também presa aérea, obtida por carbonatação com  $\text{CO}_2$  atmosférico. Na figura 5.1, encontra-se representada a cal hidráulica utilizada.



*Figura 5.1 - Cal Hidráulica HL5*

Esta cal hidráulica foi classificada segundo a norma NP EN 459-1 (IPQ,2015) .

As suas características técnicas encontram-se enumeradas na sua Ficha Técnica, no Anexo 3.

#### **5.2.1 Areias**

Na elaboração das diferentes misturas das argamassas de desempenho térmico melhorado foram utilizados quatro tipos de areias: APAS 12, APAS 20, APAS 30 e FPSI 120. Na figura 5.2, encontra-se representada a areia APAS 20.



*Figura 5.2 - Areia APAS 20*



As areias APAS 12, APAS 20 e APAS 30 são areias lavadas, siliciosas cujo principal constituinte é o quartzo, com durezas elevadas, constituídas por elementos rolados de forma alongada e textura granoblástica, poligonal e heterogranular.

A areia FPS 120 é uma areia lavada, siliciosa constituída por quartzo e turmalina, cujos agregados possuem uma forma predominantemente esférica, sub-arredondadas e com superfície rugosa.

As fichas de declaração de desempenho das areias mencionadas encontram-se no Anexo 3.

### 5.2.2 Pellets de madeira

Os pellets de madeira possuem uma forma cilíndrica e pequenas dimensões, cerca de 6-8 mm de diâmetro e 10-30mm de comprimento, sendo necessário proceder à sua moagem para poderem ser utilizados como agregados na elaboração de argamassas. Na figura 5.3 encontram-se demonstrados os pellets de madeira, antes da sua moagem.



*Figura 5.3 - Pellets de madeira antes da moagem*

Na campanha experimental realizada, foram utilizados pellets de madeira que já tinham sofrido um processo de moagem. Esta moagem foi realizada conforme descrito em Martinho (2017), onde foi utilizado um método de moagem manual, utilizando um pilão metálico uma caixa sem fundo e uma manta de plástico.

Neste processo fez-se cair um pilão 30 vezes sobre os pellets de madeira de uma altura de cerca de 50 cm de altura, sendo depois o material agrupado novamente e repetindo o processo. Após terem sofrido as pancadas os pellets são peneirados e separados segundo a sua granulometria.



Figura 5.4 - Processo de moagem dos pellets de madeira (Martinho,2017)

### 5.2.3 Aditivos

De modo a melhorar a trabalhabilidade da argamassa foi utilizado na sua conceção um superplastificante, *Chryso Fluid Premia 180*, do tipo polycarboxilato.



Figura 5.5 - Superplastificante Chryso Fluid Premia 180

Na figura 5.5 está representado o equipamento utilizado, cuja ficha técnica encontra-se no Anexo 3.

### 5.2.4 Água

A água utilizada na produção das argamassas foi obtida diretamente da rede pública. A sua quantidade foi aferida em função da trabalhabilidade pretendida tendo por base o ensaio de consistência por espalhamento.

## 5.3 Caracterização dos materiais constituintes das argamassas

### 5.3.1 Análise Granulométrica dos agregados

Com a finalidade de encontrar a percentagem de cada areia, de modo a otimizar a mistura, foi efetuada uma análise granulométrica por peneiração gravítica para cada uma delas.

Na figura 5.6 estão exemplificados os peneiros da série principal e da série secundária

No quadro 5.1 estão descritos os peneiros utilizados na análise descrita.

Série Principal		Série Secundária	
Designação do Peneiro	Abertura da malha (mm)	Designação do Peneiro	Abertura da malha (mm)
6"	152,4	4"	101,6
3"	76,1	2"	50,8
1"1/2	38,1	1"	25,4
3/4"	19	1/2"	12,7
3/8"	9,51	1/4"	6,35
Nº 4	4,75		
Nº 8	2,36		
Nº 16	1,18		
Nº 30	0,595		
Nº 50	0,297		
Nº 100	0,149		
Nº 200	0,075		

Figura 5.6 - Peneiros série principal e série secundária

Estes ensaios de peneiração foram realizados de acordo com a norma NP EN 933-1:2000 (IPQ,2000) cujo procedimento irá ser enunciado em seguida:

Primeiramente são colocados os conjuntos de peneiros a utilizar sobrepostos, por ordem crescente de abertura da malha, sendo que no caso específico começou-se a partir do peneiro nº4, sendo colocado no fundo o tabuleiro de peneiros.

Quadro 5.1 - Peneiros utilizados

Peneiros Utilizados	
Designação do Peneiro	Abertura da malha (mm)
Nº 4	4,75
Nº 8	2,36
Nº 16	1,18
Nº 30	0,595
Nº 50	0,297
Nº 100	0,149
Nº 200	0,075

Foram colocados 500 g da amostra no peneiro de maior abertura, de seguida foram agitados mecanicamente, fazendo desta forma a areia passar através dos diferentes peneiros. Após terem decorrido 10 minutos do início da agitação são retiradas e pesadas as frações que ficam retidas em cada peneiro, assim como a quantidade que passa por cada um deles. Na figura 5.7 está representado o processo de peneiração mecânica.

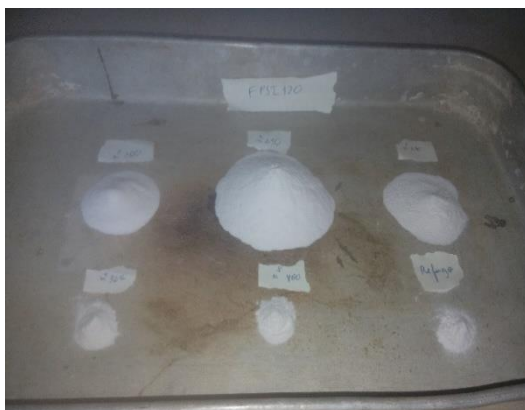


*Figura 5.7 - Processo de peneiração mecânica*

Em seguida, são anotados esses valores, sendo esses resultados apresentados segundo uma distribuição mássica em função da malha das aberturas, formando assim uma curva granulométrica. Na figura 5.8 estão representados dois tipos de areias após peneiração mecânica.

Através destes ensaios obtêm-se (para além da curva granulométrica) a máxima dimensão do agregado,  $D_{máx}$ , a mínima dimensão do agregado,  $D_{min}$ , e o módulo de finura, MF.

O  $D_{máx}$  é dado pela malha do peneiro de menor dimensão, pela qual passa uma percentagem superior ou igual a 90 % da massa total da amostra. Sendo assim o agregado pode conter um máximo de 10% de partículas com dimensão superior a  $D_{máx}$ .



*Figura 5.8 - Areias após peneiração mecânica*

O  $D_{min}$  corresponde à malha de maior dimensão, pela qual passa uma percentagem inferior ou igual a 5 %;

O Módulo de Finura do agregado é obtido pelo quociente por 100, da soma das massas retidas acumuladas nos peneiros da série principal, excetuando o peneiro nº200. Em suma, o Módulo de Finura, MF, é dado pela equação seguinte:

$$MF = \frac{\sum \text{Retidos Acumulados da Série Principal até ao Peneiro nº100}}{100} \quad (14)$$

Este valor (adimensional) pode ser interpretado como a posição do peneiro cuja abertura da malha representa a dimensão média ponderada das partículas de uma areia, ou da mistura de várias areias, numa escala em que MF=1 corresponde ao peneiro nº100 (0,149 mm), MF=2 ao peneiro nº50, MF=3 ao peneiro nº30, e assim sucessivamente em que apenas são considerados os peneiros da série principal (Coutinho, 2002).

### 5.3.2 Baridade

A Baridade foi determinada segundo a norma NP EN 1097-3:2002 (IPQ,2002) . Esta grandeza física é determinada tendo como base a massa de material seco que preenche um recipiente com capacidade conhecida, e pode ser definida como a massa por unidade de volume aparente em condições de compactação definidas. Esta grandeza pode ser determinada para agregados secos ou para agregados húmidos. Sendo o procedimento a utilizar o seguinte:

- Determina-se a massa  $m_0$  do recipiente utilizado para a determinação da baridade;
- Após o material ser sujeito a condicionamento seco, é homogeneizado e em seguida colocado num recipiente cilíndrico impermeável através de um funil de sólidos, que se encontra apoiado numa superfície horizontal com orifício;
- A colocação é feita em 3 camadas, sendo cada camada compactada 20 vezes com recurso a um pilão metálico;
- O material contido no recipiente é posteriormente nivelado com uma régua metálica, com o cuidado de não a compactar;
- Em seguida, procede-se à pesagem do recipiente preenchido, numa balança com precisão de 0,1g.

O valor da baridade  $Ba$ , em g/m<sup>3</sup> foi calculado de acordo com a seguinte expressão

$$Ba = \frac{m_1 - m_0}{V} \quad (15)$$

sendo que,

$m_0$  – massa do recipiente utilizado para a determinação da baridade do material ensaiado (g);

$m_1$  – massa do recipiente cheio com material de que se pretende determinar a baridade (g) ;

$V$  – corresponde à capacidade do recipiente (cm<sup>3</sup>).

De modo a conhecer-se a capacidade do recipiente, foi realizado o procedimento de ensaio segundo as indicações da norma NP EN 1097-3:2002 (IPQ,2002).

## 5.4 Preparação das argamassas e provetes

Relativamente à preparação das argamassas, utilizou-se o procedimento descrito na norma NP EN 196-1:2017 (IPQ,2017).

### 5.4.1 Dosagem

Tendo em conta o número de misturas a preparar, possuindo cada uma delas diferentes percentagens de agregado (pellets de madeira e areias), inicialmente foi calculada a quantidade total de agregado a utilizar para todas as misturas. Sabendo o número total de provetes a utilizar para cada um dos ensaios pretendidos, é possível saber o volume total de argamassa que terá de ser produzido e, dividindo pelo número de misturas, o volume para cada uma das misturas.

Sabendo a quantidade de agregado para cada uma das misturas, e sabendo que a relação admitida para a produção da argamassa é 1:3, em massa, obtemos facilmente o volume de ligante a utilizar para cada uma das misturas, sendo a quantidade igual para cada uma delas.

Finalmente, multiplicando pelos valores de baridade, obtidos anteriormente, obtemos a massa de cada um dos agregados, bem como a massa do ligante.

A relação de água/ligante (A/L) admitida primeiramente para a mistura sem pellets foi de 0,8. Para as restantes composições este valor foi incrementado consoante o aumento da percentagem de pellets na mistura de modo a obter a trabalhabilidade pretendida. A dosagem de água foi colocada em duas porções, em virtude da utilização de um superplastificante no estado líquido. A porção inicial correspondeu a 90 % do total da água a introduzir (sendo esta colocada na primeira fase da mistura) e a porção final correspondeu a 10% do total de água (colocada na segunda fase da mistura).

Relativamente ao superplastificante utilizado, foi admitida a proporção de 0,8 % face à massa do ligante. Esta percentagem manteve-se constante para todas as misturas realizadas e surge devido a estudos realizados previamente.

#### 5.4.1.1 Mistura

De modo a poder produzir-se corretamente as argamassas pretendidas, recorreu-se ao uso de alguns equipamentos e utensílios específicos, tais como, uma balança e recipientes para acomodar os constituintes sólidos e líquidos durante as pesagens, uma misturadora mecânica e o respetivo recipiente de mistura, a cuba, e uma espátula de borracha. Na figura 5.9 estão representados a cuba e a misturadora.

Os tempos de mistura, instantes de introdução dos constituintes, o modo de mistura, os equipamentos e a técnica empregue têm influência nas propriedades de misturas à base de ligantes hidráulicos, tanto no seu estado fresco, como no seu estado endurecido (Bras;Henriques 2009).

Portanto, para as misturas se encontrarem em igualdade de circunstâncias e para que o fator que influenciasse as suas propriedades finais fosse apenas os seus componentes, os fatores acima referidos foram realizados de igual modo para todas as composições.

Após o cálculo das massas deu-se início ao procedimento para o fabrico das argamassas, sendo este enunciado em seguida:

- Pesagem dos constituintes sólidos numa balança com precisão de 0,1 g, seguido de uma primeira homogeneização manual e a seco com recurso a uma colher de pedreiro num tabuleiro metálico;
- Colocação da massa seca (agregado + ligante) na cuba, e em seguida a cuba na misturadora. Após estar fixa, liga-se a misturadora durante 30 segundos para a massa ficar totalmente homogeneizada;
- Após a homogeneização retira-se a cuba, acrescenta-se a primeira porção de água e mistura-se durante 60 segundos;
- Limpeza dos bordos com recurso a uma espátula de borracha para misturar algumas porções que não tenham sido devidamente misturadas na misturadora;



- Adição da segunda porção de água devidamente misturada com o superplastificante, colocação da cuba novamente na misturadora mistura-se durante 60 segundos;
- Observação visual da consistência da argamassa. Caso seja necessário, introduz-se água de forma a atingir o espalhamento pretendido, sendo depois seguido de 60 segundos de mistura na misturadora. No máximo, apenas podem ser feitas três adições de 10 mL. Se a argamassa não apresentar a consistência pretendida após a terceira adição, é rejeitada;
- Ensaio de consistência por espalhamento.



*Figura 5.9 - Cuba e misturadora*

#### **5.4.1.2 Moldagem e cura dos provetes**

Para cada composição preparada foram produzidos 3 provetes prismáticos, com dimensões 40x40x160 mm e 2 provetes circulares com 8,5 cm de diâmetro e 1cm de espessura. O processo de moldagem e cura dos provetes seguiu as indicações da norma NP 196-1:2017(IPQ,2017).

Para a moldagem dos provetes foi necessário recorrer ao uso de alguns equipamentos específicos, nomeadamente os moldes metálicos, o compactador mecânico e a colher de pedreiro. Na figura 5.10 está representado o compactador mecânico utilizado.

O processo de moldagem teve o seguinte procedimento:

- Aplicação de óleo descofrante nos moldes em que a argamassa será colocada;
- Colocação da mistura no molde;
- Colocação do molde, fixando-o bem, no compactador mecânico (com um acrescento em altura apropriado para a introdução da argamassa antes de ser compactada) fazendo o enchimento em duas camadas;
- Compactação com 20 pancadas;

- Retiração da argamassa em excesso na superfície dos moldes.

Após o este processo, os provetes foram levados para uma sala condicionada a uma temperatura de  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e humidade relativa de  $60 \pm 5\%$ . A desmoldagem foi realizada ao fim de 7 dias de idade, processo realizado com bastante cuidado para não danificar os provetes. Após isto, foram marcados e identificados tendo sido colocados novamente na sala condicionada, durante 28 dias, até à data de ensaio.



*Figura 5.10 - Compactador mecânico*

## 5.5 Plano de Ensaios

Foram produzidas cinco argamassas tradicionais no total, sendo uma delas a argamassa de referência e as outras quatro argamassas com diferentes percentagens de pellets de madeira.

Ao longo do trabalho, para designar as argamassas com 4%, 9%, 15% e 23% de pellets, adota-se a nomenclatura de argamassa  $P_4$ ,  $P_9$ ,  $P_{15}$ ,  $P_{23}$ , respetivamente, sendo que a argamassa de referência é designada de  $P_0$ .

Todas as argamassas foram caracterizadas no estado fresco e no estado endurecido, tendo sido sujeitas às mesmas condições de ensaio.

Relativamente ao estado fresco foi realizado apenas o ensaio de consistência por espalhamento. No estado endurecido, após 28 dias de cura, realizados ensaios para avaliar características físicas, nomeadamente: condutibilidade térmica, massa volúmica geométrica, absorção de água por capilaridade, secagem e porosidade aberta.

É de referir que após o processo de desmoldagem dos provetes da argamassa  $P_{23}$ , um dos três provetes produzidos não apresentou coesão suficiente, tendo-se desfragmentado em duas partes. No entanto decidiu-se aproveitar os fragmentos do provete para a realização do ensaio de porosidade aberta.



## 5.6 Caracterização das argamassas no estado fresco

### 5.6.1 Consistência por espalhamento

O valor da consistência por espalhamento é uma quantificação da fluidez e/ou grau de molhagem das argamassas frescas e fornece uma indicação sobre a deformabilidade dessas argamassas quando submetidas a determinado tipo de tensão (Faria,2004).

Após o processo de preparação das argamassas e antes de serem colocadas nos respectivos moldes, foi realizado o ensaio de consistência por espalhamento. Este ensaio realizou-se de acordo com a norma EN 1015-3:1999 (CEN,1999).

Este ensaio utiliza-se para aferir a quantidade de água que é necessário incorporar na argamassa para obter-se a trabalhabilidade desejada, que é função da utilização que se pretende dar à argamassa (reboco ou assentamento).



*Figura 5.11 – Mesa de espalhamento, molde e varão*

Enuncia-se em seguida o procedimento realizado:

- Realizou-se o humedecimento dos utensílios utilizados para o ensaio (mesa de espalhamento, molde, varão). Estes equipamentos estão representados na figura 5.11.
- Colocou-se a argamassa no interior dentro do molde, com o cuidado de o situar no centro da mesa de espalhamento. O molde foi preenchido em duas camadas, compactando cada uma com 15 pancadas com recurso a um varão metálico;
- Após o preenchimento do molde, rasou-se a superfície com recurso a uma colher de pedreiro. Seguidamente a superfície da mesa de espalhamento foi limpa de quaisquer porções que possam ter caído no decorrer do ensaio;
- Retirou-se o molde;
- Rodou-se a manivela de modo a provocar 15 pancadas em 15 segundos;
- Mediram-se os afastamentos  $d'$  (cm) entre pontos opostos da linha de contorno da argamassa segundo três dos eixos marcados na mesa;
- O valor de espalhamento foi obtido, em percentagem, através da expressão:

$$\text{espalhamento} = \frac{d - 10}{10} \times 100 \quad (16)$$

sendo que:

d- média dos três valores d'

Procurou-se preparar argamassas com valores de espalhamento de 70 % ± 10 %.

## 5.7 Caracterização das argamassas no estado endurecido

### 5.7.1 Massa Volúmica Geométrica

Após os provetes terem sido sujeitos a um processo de cura durante 28 dias, estes foram colocados em estufa, ventilada à temperatura de 60 °C, até terem atingido massa constante. Isto considera-se quando a variação entre duas pesagens intervaladas de 24 horas é menor ou igual a 0,1 % da massa do provete.

Após terem atingido massa constante, procedeu-se à sua pesagem, recorrendo a uma balança com precisão de 0,001 g, registando-se o valor M (massa) de cada provete.

Seguidamente, com recurso a uma craveira digital, são registadas as dimensões dos provetes, “a”, “b”, e “c”, para ambos os lados de cada provete. O valor final de cada dimensão é então obtido após a realização da média entre os dois valores obtidos.

O valor da massa volúmica, em kg/m<sup>3</sup>, é então obtido pela seguinte fórmula:

$$\text{Massa Volúmica} = \frac{M}{(a \times b \times c)} \quad (17)$$

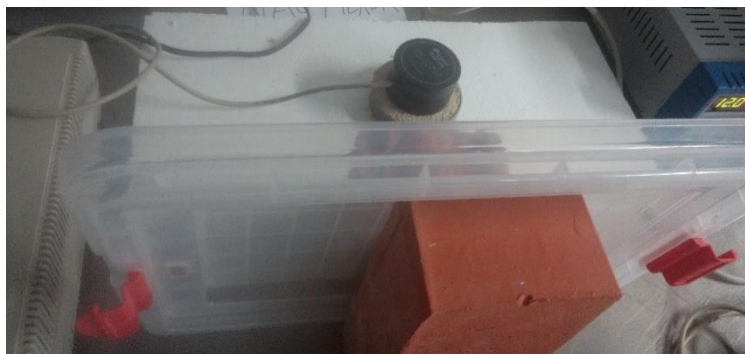
### 5.7.2 Ensaio de Condutibilidade Térmica

A condutibilidade térmica ( $\lambda$ , expressa em [W/(m.k)] ou [W/(m.°C)]) é uma propriedade que caracteriza os materiais ou produtos termicamente homogêneos, e que representa a quantidade de calor ( expressa em [W] por unidade de área [m<sup>2</sup>] que atravessa uma espessura unitária (m) de um material, quando entre duas faces planas e paralelas se estabelece uma diferença unitária de temperatura de 1 °C ou 1 K) (Matias,2006).No ensaio para a obtenção da condutibilidade térmica utilizou-se o equipamento “ISOMET Model 2014” e o procedimento de ensaio foi baseado nas suas normas de utilização. Na figura 5.12 está representado o equipamento utilizado.



Figura 5.12 - ISOMET Model 2014

Após terem sido retirados da estufa ventilada, de modo a garantir o menor teor em água possível, os provetes cilíndricos são colocadas sobre uma placa de XPS assente numa superfície plana, conforme representado na figura 5.13.



*Figura 5.13 - Ensaio de condutibilidade térmica*

Foram registados seis valores de condutibilidade térmica para cada mistura realizada, ou seja, três valores de condutibilidade térmica para cada provete cilíndrico. O valor final foi calculado através da média entre os valores registados para cada mistura.

### **5.7.3 Ensaio de absorção de água por capilaridade**

O ensaio de água por capilaridade foi realizado com recurso à norma EN 1015-18:2002 (CEN,2002), realizado numa sala condicionada a uma temperatura de  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  e uma humidade relativa de  $60\pm 5\%$ . Este ensaio permite avaliar o aumento da massa de água que ascende por capilaridade, pela secção do provete em contato com a superfície de água.

Após terem sido retirados da estufa, procedeu-se a impermeabilização das faces dos provetes, com recurso a uma mistura quente de cera de abelha com pez de louro (traço ponderal 1:1), deixando apenas a base e o topo por impermeabilizar de modo a garantir que a ascensão capilar fosse feita apenas unidireccionalmente. Na figura 5.14 estão representados os provetes impermeabilizados.



*Figura 5.14 - Provete prismático após impermeabilização das paredes*

Precedentemente ao começo do ensaio, os provetes, já impermeabilizados, são pesados numa balança com precisão de 0,001g e deixados a arrefecer.

Posteriormente é preparada uma caixa estanque com um ambiente saturado de humidade. Para isso, são colocados dois tijolos com alturas iguais dentro da caixa e cobertos com água. Durante o ensaio a caixa permanece fechada, de modo a manter constantes as condições de humidade e de ambiente saturado.

Seguidamente colocaram-se os provetes num tabuleiro preenchido com uma lâmina de água de 2mm. O tabuleiro é nivelado com uma rede plástica no fundo, de modo a ser garantido o contacto da base do provete com a água. O tabuleiro foi posteriormente colocado na caixa. Na figura 5.15 está representado o ensaio de absorção de água por capilaridade.



*Figura 5.15 - Ensaio de absorção de água por capilaridade*

É de referir que os 2mm de altura de água foram controlados e repostos conforme necessário.

A intervalos de tempos definidos, foi determinada a massa de cada provete, nomeadamente ao fim de 5,15,30,60 e 90 minutos e 24 horas e a partir de então de 24 em 24 horas.

A quantidade de água absorvida  $m_i$ , em  $\text{kg/m}^2$ , através da expressão,

$$m_i = \frac{m_2 - m_1}{S} \quad (18)$$

em que,

$m_1$ : massa do provete seco, no início do ensaio (kg);

$m_2$ : massa do provete após decorrido o intervalo de tempo correspondente  $t_i$  (kg);

$S$ : área da face em contacto com a água ( $\text{m}^2$ ).

Com os valores obtidos pelo ensaio, é traçado o gráfico com abcissas expressas em termos de  $\sqrt{t}$  (em segundos) e ordenadas em  $\text{kg/m}^2$ . O coeficiente de absorção de água por capilaridade, expresso em  $\text{kg/m}^2.\text{s}^{1/2}$ , corresponde ao coeficiente angular do troço inicial das curvas traçadas – no geral, um segmento de reta que passa na origem.

O ensaio decorreu até todos os provetes estarem saturados com água absorvida por capilaridade, determinando-se o valor assintótico das curvas de absorção, que se considerou atingido quando a diferença entre dois valores sucessivos  $m_i$  e  $m_{i-1}$ , foi menor que 1%. Nestas circunstâncias,  $m_i$  é o valor assintótico, expresso em  $\text{kg/m}^2$ .

Este valor quantifica a quantidade total de água que, por unidade de superfície, penetra na argamassa, enquanto o coeficiente de capilaridade traduz a velocidade com que essa absorção ocorre nos instantes iniciais (Faria,2004).

#### 5.7.4 Secagem

O ensaio de secagem foi realizado após o término do ensaio de absorção de água, realizado segundo a norma EN 16322:2013 (CEN,2013). Foi colocada uma película aderente na base provetes de modo a permitir que a secagem fosse realizada apenas pelo topo do provete. Os períodos de pesagem para a medição da massa foram efetuados aquando do final do ensaio de capilaridade e posteriormente de 24 em 24 horas. O processo deu-se por terminado quando se verificou que os provetes tinham atingido massa constante entre pesagens sucessivas. Na figura 5.16 está representado o ensaio de secagem.



Figura 5.16 - Ensaio de secagem

Com os dados registados calculou-se o teor em água dos provetes através da seguinte equação,

$$wt = \frac{m_i - m_0}{m_i} \quad (19)$$

em que,

$W_t$ : teor em água (%);

$m_i$ : massa do provete no instante  $t_i$  (g);

$m_0$ : massa do provete seco (g).

Também foi determinado o índice de secagem (IS), através da seguinte fórmula,

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [(t_i - t_{i-1}) \times (\frac{W_{t_{i-1}} + W_{t_i}}{2})]}{Q_{m\acute{a}x} \times t_f} \quad (20)$$

em que,

IS: índice de secagem;

$t_i$ : instante de ensaio  $i$  (h);

$t_f$ : tempo final de ensaio (h);

$W_{t_i}$ : teor em água do provete no instante  $t_i$  (%);

$Q_{m\acute{a}x}$ : teor em água máximo do provete (instante inicial do ensaio) [%].



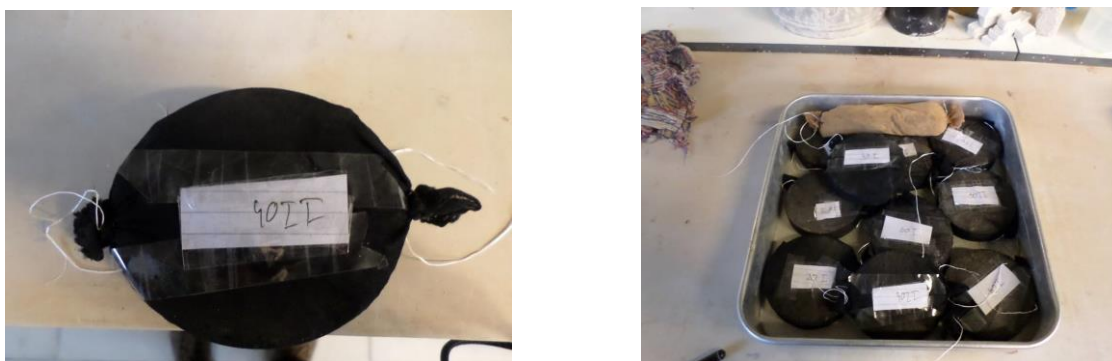
O índice de secagem (IS) foi determinado para cada um dos provetes ensaiados, tendo o valor final sido obtido pela média dos três de maneira a representar o comportamento da argamassa em relação ao processo de secagem a longo prazo.

Através do cálculo do declive do troço inicial da curva de secagem, calculou-se ainda a taxa de secagem (TS), correspondente às primeiras horas do ensaio.

### 5.7.5 Porosidade aberta

O ensaio de porosidade aberta foi realizado conforme a norma NP EN 1936 (IPQ,2008).

Na realização deste ensaio foram usados os provetes cilíndricos decorrentes do ensaio de condutibilidade térmica, bem como o provete número III da mistura P<sub>23</sub>, que foi danificado após a desmoldagem.



*Figura 5.17 - Provetes preparados para o ensaio de porosidade aberta*

Para a realização deste ensaio, os provetes foram revestidos com recurso a uma meia elástica e devidamente identificados, tal como mostra a figura 5.17, e posteriormente colocados na estufa ventilada durante 24 horas. Após a sua retirada da estufa foi registada a sua massa,  $M_1$  de cada provete com recurso a uma balança de precisão 0,001 g.

Seguidamente foram colocados num exsicador interligado a uma bomba de vácuo por meio de um kitasato contendo sílica-gel, ficando sobre uma pressão de 2667 Pa durante 24 horas, após o qual se



*Figura 5.18 – Exsicador contendo os provetes*

introduz lentamente no exsicador a quantidade de água necessária para a total imersão dos provetes. Na figura 5.18 está representado este processo.

Os provetes são mantidos nestas condições durante 24 horas e nas 24 horas seguintes à pressão atmosférica normal. Após isto foi realizada a pesagem hidrostática, em que os provetes são pesados encontrando-se suspensos em suporte pendurado na parte inferior da balança, registando-se a massa  $M_2$ . Na figura 5.19 está representada esta pesagem.

Finalmente, retiraram-se os provetes da água, sendo colocados durante alguns instantes sobre papel absorvente, sendo depois determinada a massa dos provetes saturados  $M_3$ .



*Figura 5.19 - Pesagem Hidrostática (Ensaio de porosidade aberta)*

A porosidade aberta  $P_{ab}$ , em percentagem, é dada pela seguinte expressão,

$$P_{ab} = \frac{M_3 - M_1}{M_3 - M_2} \times 100 \quad (21)$$





## 6 Apresentação e discussão dos resultados experimentais

### 6.1 Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através dos ensaios enunciados no capítulo anterior, bem como, uma análise crítica aos seus valores. Explicam-se ainda as decisões efetuadas ao longo dos mesmos.

Em primeiro lugar serão analisados os resultados provenientes da caracterização dos materiais constituintes das argamassas, sendo de seguida analisados os resultados obtidos na caracterização das argamassas no estado fresco, e por fim os resultados da caracterização das argamassas no estado endurecido.

### 6.2 Constituintes das argamassas

#### 6.2.1 Análise granulométrica dos agregados

A análise granulométrica foi realizada conforme descrito na secção 5.3.1 para os agregados a utilizar.

A partir dos resultados da peneiração mecânica foram realizadas as curvas granulométricas para as diferentes areias, para os pellets de madeira e para uma mistura de pellets de madeira com areia. Também foi calculado o módulo finura para os elementos referidos anteriormente.

Na figura 6.1, 6.2 e 6.3, estão representadas as curvas granulométricas para a mistura de areias, para os pellets de madeira e para a mistura de pellets de madeira com areias, respetivamente.

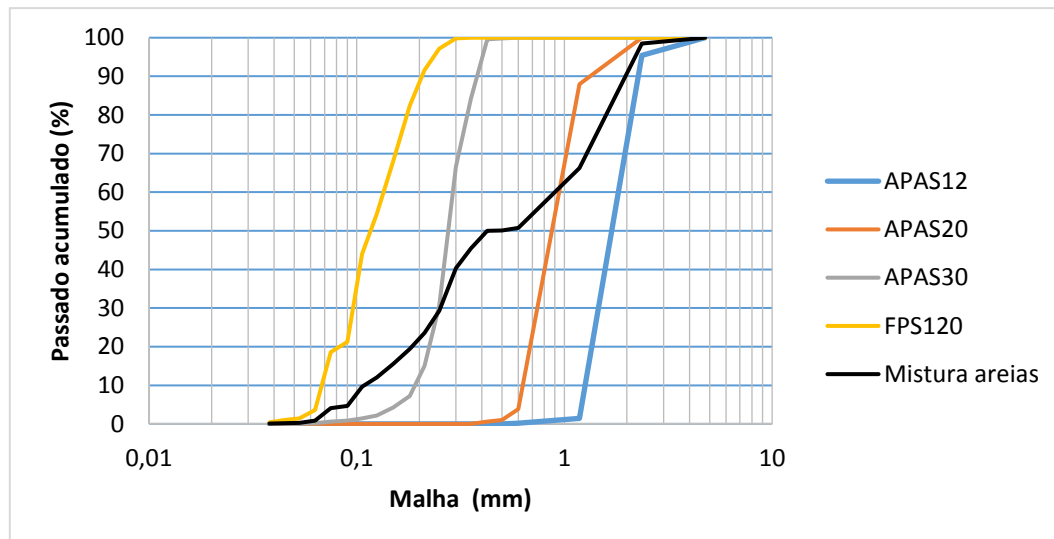


Figura 6.1 - Curvas granulométricas (Areias)

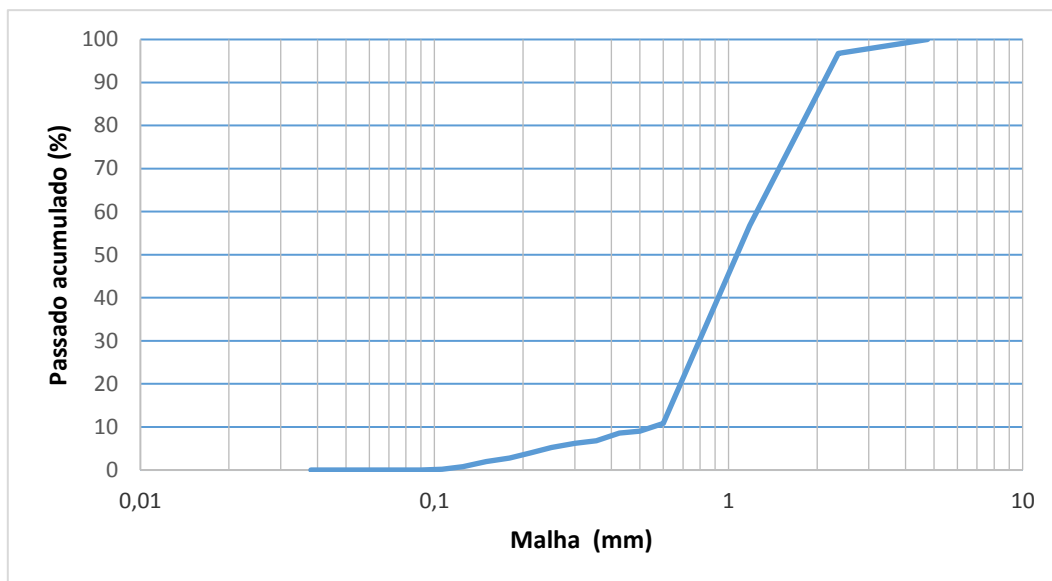


Figura 6.2 - Curva granulométrica dos Pellets de madeira

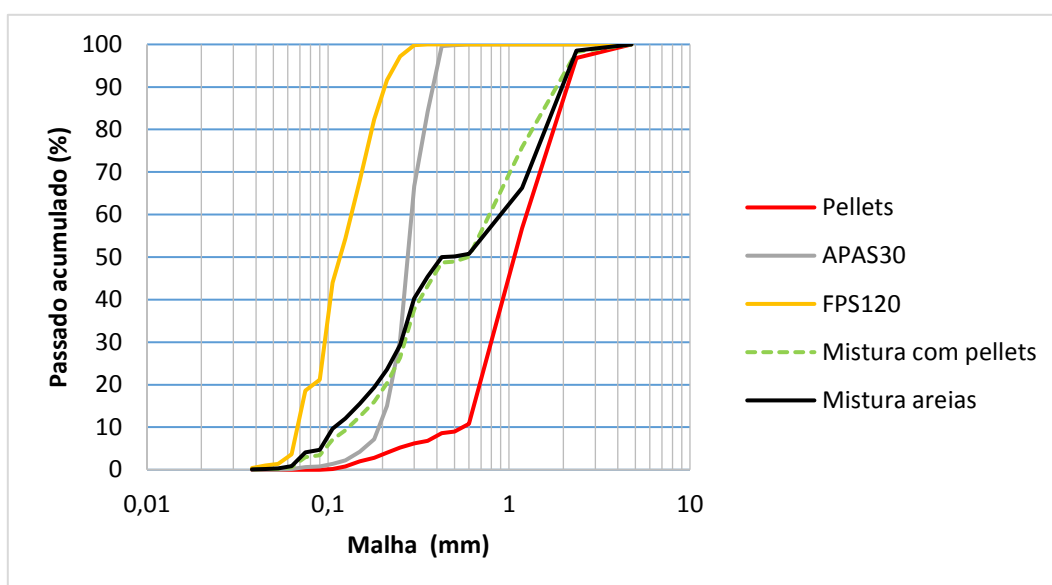


Figura 6.3 - Curvas granulométricas das areias, mistura de areias, pellets e mistura com pellets

Quadro 6.1 - Módulos de finura dos agregados

Agregados	Módulo de Finura
APAH 12	4,0
APAS 20	3,1
APAS 30	1,3
FPS 120	0,3
Wood Pellets	3,3
Mistura de Areias	2,3
Mistura de Areias ( APAS 30 + FPS 120) com Wood Pellets	2,3

Através da análise granulométrica obteve-se também os módulos de finura para cada um dos elementos, representados no quadro 6.1.

Os restantes gráficos das curvas granulométricas para as diferentes areias encontram-se expostos no anexo 2.

## 6.2.2 Baridade

A Baridade dos materiais constituintes foi obtida conforme enunciado na secção 5.3.1.2.

Os valores de baridade obtidos, encontram-se no quadro 6.2.

*Quadro 6.2- Ensaio de Baridade*

Material	Massa Medida (kg)	Baridade (kg/m <sup>3</sup> )
APAS 12	1,80	1518,8
APAS 20	1,78	1490,6
APAS 30	1,74	1440,9
FPS 120	1,74	1438,3
Wood Pellets	1,06	527,1
NHL5	1,34	900,0

Os valores de baridade obtidos para as diferentes areias e para a cal hidráulica apresentam os valores esperados conforme as indicações fornecidas pelos fabricantes.

Em relação aos pellets de madeira podemos observar, que a sua baridade é substancialmente menor do que a das Areias (aproximadamente 3 vezes). Isto permite antever que as argamassas com maior percentagem de pellets de madeira (e ao mesmo tempo menor percentagem de areia) irão possuir uma menor massa volúmica.

## 6.3 Argamassa no estado fresco

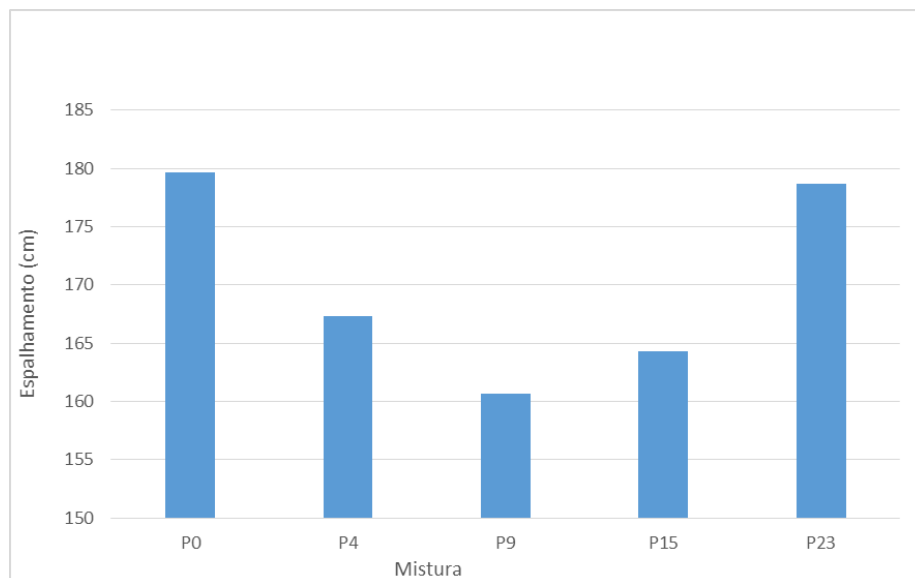
### 6.3.1 Consistência por espalhamento

Os resultados do ensaio de consistência por espalhamento estão representados no quadro 6.3 e na figura 6.4.

*Quadro 6.3 – Ensaio de consistência por espalhamento*

Mistura	Espalhamento (mm)	%
P <sub>0</sub>	179,7	79,7
P <sub>4</sub>	167,3	67,3
P <sub>9</sub>	160,7	60,7
P <sub>15</sub>	164,3	64,3
P <sub>23</sub>	178,7	78,7

Observando os valores obtidos podemos constatar que os valores de espalhamento se encontram dentro da gama de valores pretendidos, ou seja,  $170 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$ . No entanto tendo em conta as especificações da norma europeia EN 1015-3 (CEN,1999), que indica um valor de  $175 \pm 10 \text{ mm}$  como referência para argamassas para rebocos, os valores das misturas P<sub>9</sub> e P<sub>15</sub> podem ser considerados baixos.



*Figura 6.4 - Resultados do ensaio de consistência por espalhamento*

Ao analisar, à primeira vista, o andamento dos valores de espalhamento, rapidamente se constata que não existe uma progressão lógica consoante o aumento da percentagem de pellets adicionados na mistura. No entanto é necessário ter em conta que as relações de A/L utilizadas na elaboração das misturas não foram constantes, tendo esta sido aumentada com o aumento da dosagem de pellets utilizado. No quadro 6.4, encontram-se representadas as relações a/l finais, utilizadas para cada uma das misturas.

*Quadro 6.4 - Relações água/ligante finais*

Mistura	Relação a/l
P <sub>0</sub>	0,80
P <sub>4</sub>	1,20
P <sub>9</sub>	1,58
P <sub>15</sub>	2,05
P <sub>23</sub>	2,40

Segundo (Martinho, 2017) consoante o aumento da percentagem de pellets as argamassas perdem consistência, devido aos pellets absorverem água nos instantes iniciais, sendo esta libertada mais tarde, sem benefícios para a trabalhabilidade.

Sendo assim apesar dos valores obtidos não mostrarem um decréscimo na diminuição do espalhamento com o aumento na percentagem de pellets adicionados, é seguro afirmar que a sua

adição provoca uma diminuição na trabalhabilidade da argamassa, que varia proporcionalmente à percentagem de pellets.

## 6.4 Argamassa no estado endurecido

### 6.4.1 Massa Volúmica Geométrica

Na figura 6.5, observam-se os valores obtidos através do ensaio de massa volúmica geométrica.

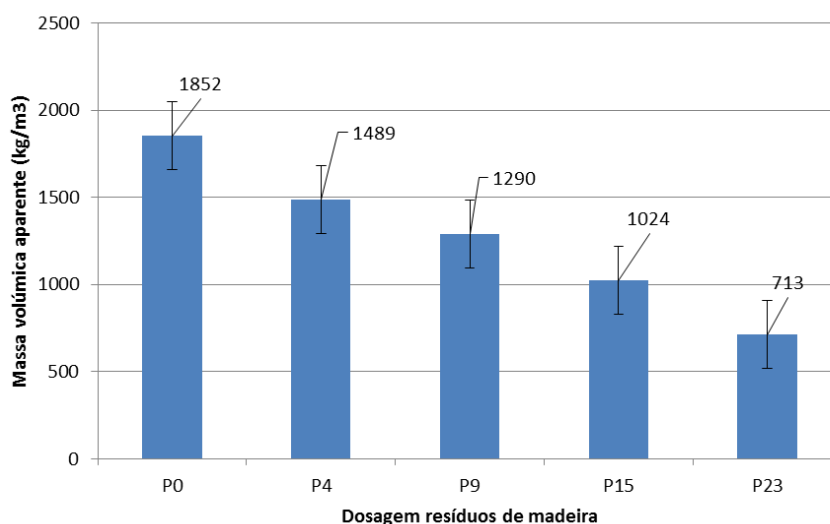


Figura 6.5 - Massa volúmica geométrica

Conforme expectável, verifica-se que as misturas que apresentam uma maior percentagem de pellets apresentam uma menor massa volúmica, devido a possuírem uma baridade bastante mais reduzida do que a das areias utilizadas (conforme referido em 6.3.1). Estes resultados também se observam visualmente, na medida em que é possível visualizar o aumento de poros nos provetes prismáticos com o aumento da dosagem de pellets. Ou seja, estes provocam um aumento do teor em ar incorporado aquando da amassadura das argamassas, diminuindo assim a sua massa volúmica.

### 6.4.2 Ensaio de condutibilidade térmica

Os resultados obtidos através do ensaio de condutibilidade térmica, estão representados na figura 6.6.

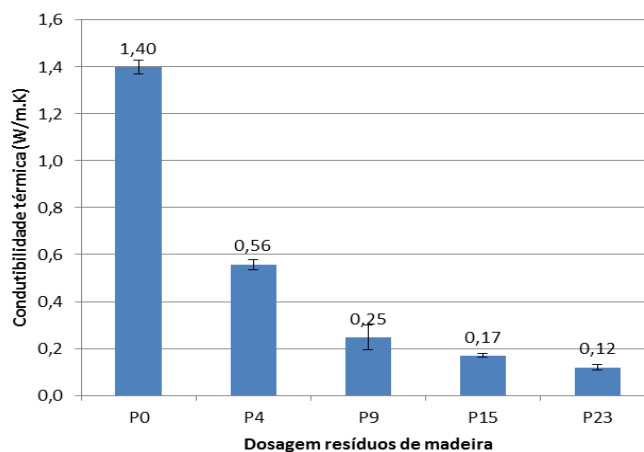


Figura 6.6 - Resultados do ensaio de condutibilidade térmica

Este ensaio foi um dos mais importantes da campanha experimental deste trabalho, visto a condutibilidade térmica ser a característica dos materiais mais relevantes, quando se trata de eficiência energética.

Os resultados mostram que a introdução de pellets de madeira na constituição das argamassas provoca uma diminuição significativa na condutibilidade térmica das argamassas. Analisando estes resultados, observamos que a substituição de apenas 4% de areia por pellets, traduz-se na redução de cerca de 60 % na condutibilidade térmica (1,40 W/m.K para 0,56 W/m.K) e a substituição de 23 % de areia por pellets reduz a condutibilidade térmica da argamassa em 90 %.

A diminuição da condutibilidade térmica está relacionada com a sua massa volúmica, na medida em que, uma diminuição na massa volúmica das argamassas provoca também uma diminuição na condutibilidade térmica. Fazendo uma comparação com os valores obtidos no ensaio de massa volúmica, verifica-se que a argamassa P<sub>23</sub> é aquela que possui menor valor de massa volúmica (713 kg/m<sup>3</sup>) e simultaneamente o menor valor de condutibilidade térmica (0,12 W/m.K). Assim como a argamassa P<sub>0</sub> é aquela que possui maior valor de massa volúmica (1852 kg/m<sup>3</sup>) e de condutibilidade térmica (1,40 W/m.K).

A gradual diminuição da massa volúmica também é facilmente explicável visto que a madeira possuiu um valor de condutibilidade térmica bastante inferior ao da areia.

Se for feita uma comparação com outros autores, com metodologias de trabalho e materiais semelhantes, os resultados obtidos revelam-se bastante promissores.

Martinho (Martinho 2017) utilizou várias percentagens de pellets de madeira em argamassas de cimento. Iniciando o seu trabalho com uma argamassa de referência possuindo um valor  $\lambda=1,98$ , com a introdução de 20 % de pellets, conseguiu obter uma condutibilidade térmica  $\lambda= 1,06$  W/m.K. A maior redução foi obtida para os 40 % de substituição e obtendo o valor de  $\lambda= 0,65$  W/m.K.

Brás (Brás et al. 2014) utilizou várias percentagens de cortiça para argamassas de cimento, cal hidráulica e cal hidráulica natural. Nos ensaios realizados foi possível diminuir a condutibilidade térmica em 75 % para argamassas de cimento convencionais, 20 % para argamassas de cal hidráulica e 50% para argamassas de cal hidráulica natural. A autora destaca as argamassas de cal hidráulica como as que apresentam melhores resultados, tendo obtido valores abaixo dos 0,20 W/m.K.

Leal (Leal,2012) também desenvolveu no seu trabalho, argamassas à base de cimento com adição de várias percentagens de cortiça. Este autor obteve a redução de cerca de 72 % da condutibilidade térmica substituindo 80% do agregado utilizado por partículas de cortiça, tendo obtido um valor  $\lambda = 0,47$  W/m.K, tendo a argamassa de referência o valor  $\lambda=1,70$  W/m.K.

Analisando os resultados com os de outros autores, pode-se concluir que os valores obtidos são bastantes satisfatórios, tendo-se obtido a maior redução na condutibilidade térmica das argamassas estudadas.

### 6.4.3 Absorção de água por capilaridade

Através do ensaio de absorção de água por capilaridade foi possível elaborar o gráfico de variação de massa por unidade de superfície em contacto com a lâmina de água, em função da raiz quadrada do tempo, gráfico esse que se encontra representado na figura 6.7.

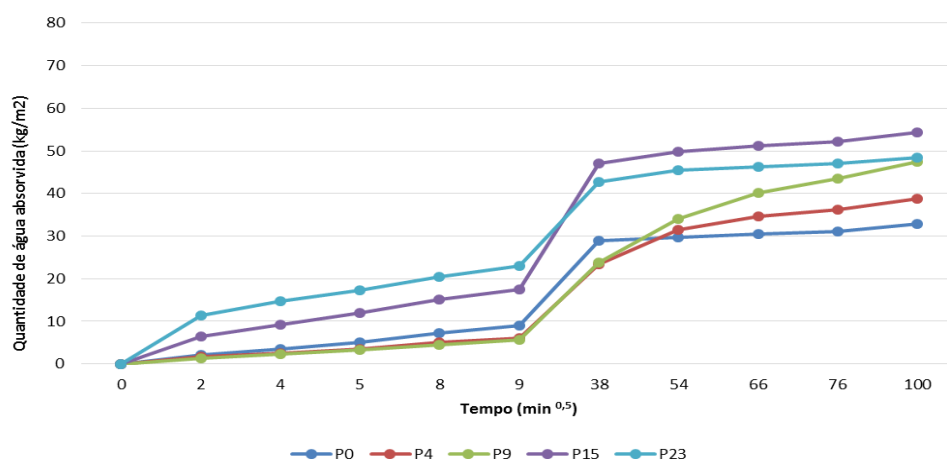


Figura 6.7 - Curvas de capilaridade

Na figura 6.8 está representada o mesmo gráfico, dando enfoque aos primeiros instantes.

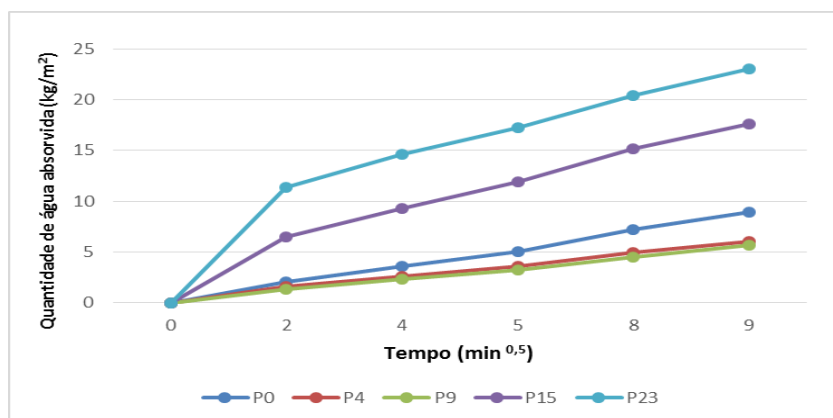


Figura 6.8 - Pormenor das curvas de capilaridade nos primeiros instantes

Nas figuras 6.9 e 6.10 são apresentados os valores do coeficiente de capilaridade e o valor assintótico para cada uma das misturas estudadas, respetivamente. Como já anteriormente referido, o coeficiente de capilaridade, CC, representa a velocidade com que a água é absorvida pelo provete, e o valor assintótico, VA, traduz o valor máximo de absorção de água pelo provete ao longo do ensaio.

Fazendo a análise relativamente ao coeficiente de capilaridade, observando a figura 6.9, verifica-se facilmente que a argamassa que possui o maior valor foi a argamassa P<sub>23</sub>. Ao analisar os valores para as outras misturas vemos que o segundo maior valor foi o da argamassa P<sub>15</sub>, sendo seguido da P<sub>0</sub>, em seguida da P<sub>4</sub> e por fim da P<sub>9</sub>. Sendo assim, não se encontra uma tendência consoante o aumento da dosagem de pellets visto que o coeficiente de capilaridade diminui até aos 9% e a partir daí aumentou em larga escala até aos 23%.

Dado que o agregado utilizado, é um agregado higroscópico, parte da água absorvida poderá estar a ser absorvida diretamente pelo agregado contrariando o facto de os poros presentes nos provetes com maior percentagem de pellets serem de dimensões bastante elevadas e, em teoria, levar à redução do coeficiente de absorção de água por capilaridade (Martinho,2017).

Se a teoria do autor estiver correta, então é possível obter uma explicação para a discrepância de resultados. Sendo assim nas argamassas com menor percentagem de pellets, P<sub>4</sub> e P<sub>9</sub>, o fator mais condicionante será a porometria face a higroscopicidade do agregado, reduzindo assim o coeficiente de absorção de água por capilaridade em relação à argamassa de referência.

Nas argamassas com maior percentagem de pellets, P<sub>15</sub> e P<sub>23</sub>, o fator mais condicionante será a higroscopicidade do agregado, face a porometria, aumentando assim o coeficiente de absorção de água por capilaridade devido a quantidade de água absorvida pelo agregado.

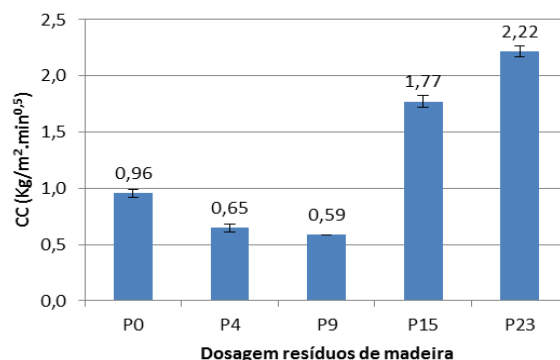


Figura 6.9 - Coeficientes de capilaridade

Analisando a figura 6.10 pode-se verificar que todas as argamassas com adição de pellets de madeira absorvem maior quantidade de água do que a argamassa de referência, P<sub>0</sub>. É então possível afirmar que a adição de pellets provocou um aumento na absorção de água capilar. A mistura que mais água absorveu foi P<sub>15</sub>, sendo seguida pela P<sub>23</sub> e P<sub>9</sub>. Não é contudo possível estabelecer uma relação entre o aumento da absorção capilar e o aumento proporção de pellets na argamassa, podendo apenas dizer-se que de um modo geral, o aumento de pellets aumenta o valor assintótico das argamassas.

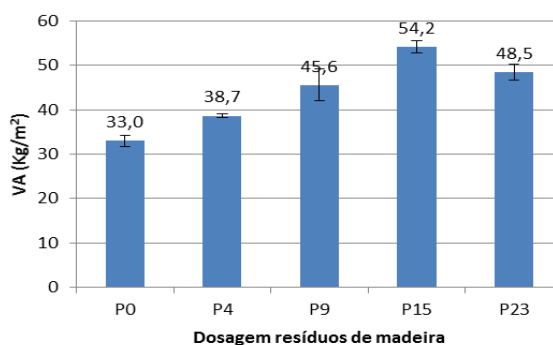


Figura 6.10 - Valores assintóticos

Analisando simultaneamente os dois parâmetros, valor assintótico e coeficiente de capilaridade, verificamos que as misturas que apresentam o melhor desempenho face à absorção capilar são a P<sub>4</sub> e P<sub>0</sub>. A argamassa com 4% de pellets apresenta um valor mais reduzido do coeficiente de absorção capilar do que a argamassa de referência, o que significa que irá absorver água mais lentamente, mas no entanto apresenta um valor assintótico mais elevado, traduzindo-se numa maior absorção de água capilar.



#### 6.4.4 Secagem

A partir do ensaio de secagem foi possível obter dois parâmetros distintos, no entanto igualmente importantes, em relação à secagem das argamassas. O primeiro parâmetro, a taxa de secagem (TS), representa a velocidade com qual ocorre a secagem da argamassa, sendo que um valor de TS elevado representa uma argamassa com maior velocidade de secagem. Os dados correspondentes a este parâmetro estão representados na figura 6.11 e 6.12.

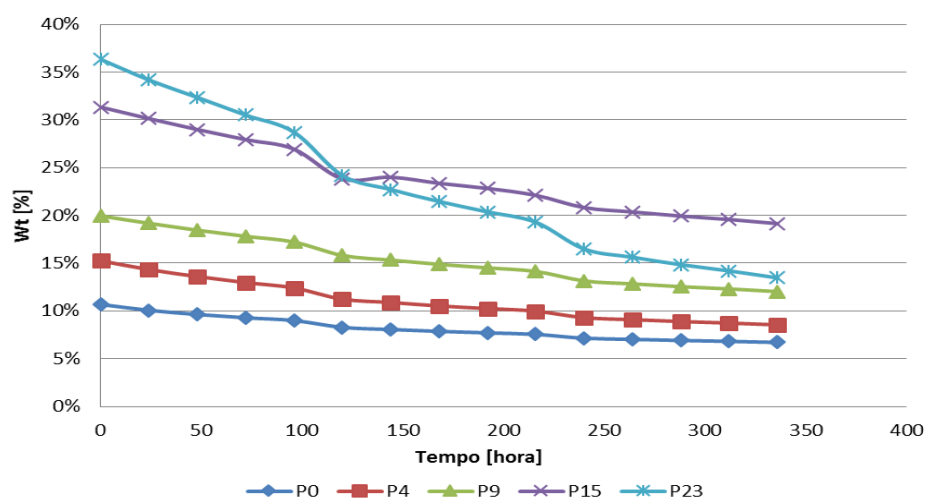


Figura 6.11 - Curvas de secagem

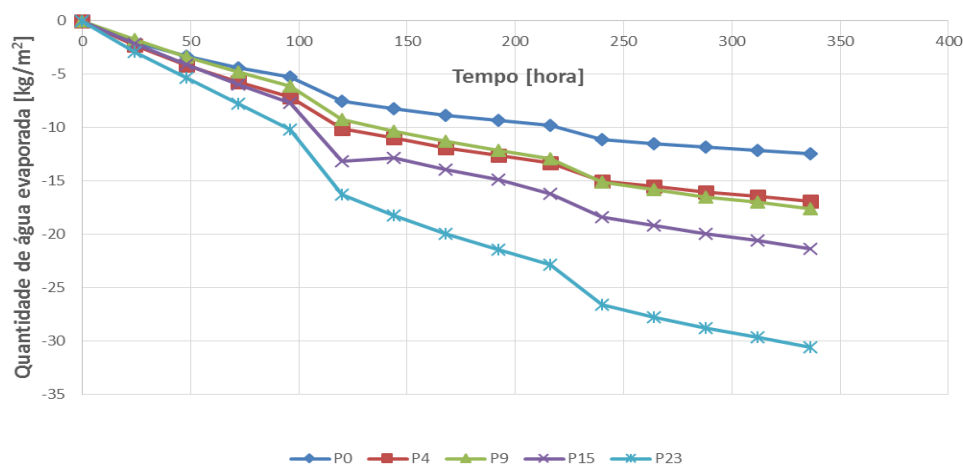


Figura 6.12 - Curva de evaporação de água

Ao analisar os valores obtidos, verifica-se que todas argamassas possuem um valor de taxa de secagem superior ao valor da argamassa de referência. Nota-se que a argamassa que possui o valor mais elevado é a P<sub>23</sub>, sendo seguida da P<sub>15</sub> e P<sub>4</sub> possuindo o mesmo valor e por fim da P<sub>9</sub>. Apesar de não seguir uma tendência linear devido à mistura P<sub>9</sub> possuir um valor mais reduzido do que a mistura P<sub>4</sub> verifica-se claramente, pelos resultados obtidos, que a introdução de pellets de madeira na produção das argamassas aumenta a velocidade com que esta seca.

O segundo parâmetro analisado, o índice de secagem (IS), traduz a secagem global da argamassa, ou seja, a facilidade com que a argamassa tem de secar, sendo que um IS elevado corresponde a uma

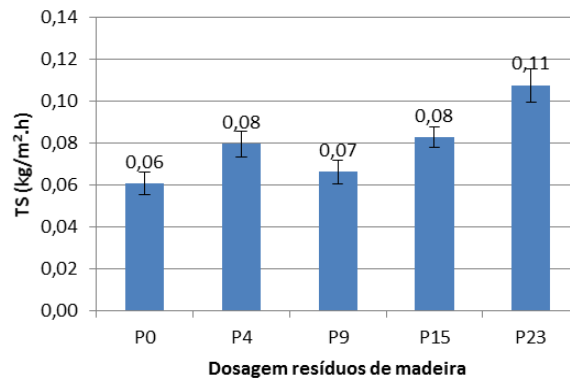


Figura 6.13 - Valores taxa de secagem

argamassa com mais dificuldade em secar. Os dados correspondentes a este parâmetro encontram-se dispostos na figura 6.14.

Efetuada a análise a este parâmetro, observa-se que não existe uma grande alteração das argamassas com pellets em relação à argamassa de referência.

Na verdade, nas primeiras quatro misturas P<sub>0</sub>, P<sub>4</sub>, P<sub>9</sub> e P<sub>15</sub>, verifica-se que os valores obtidos de IS são praticamente constantes não se observando uma redução ou aumento significativo. No entanto os valores obtidos para a argamassa P<sub>23</sub> já apresentam uma redução significativa do valor de IS, em relação à argamassa de referência P<sub>0</sub>, o que pode evidenciar que para grandes percentagens de pellets as argamassas terão maior facilidade na secagem.

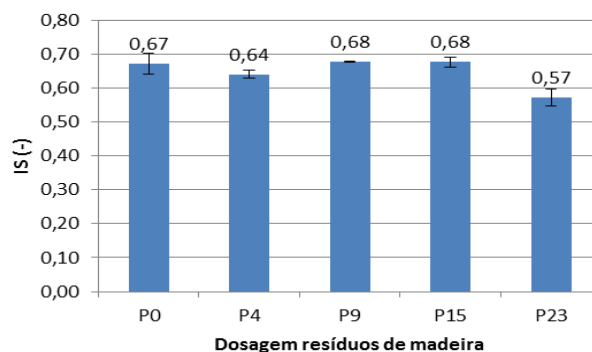


Figura 6.14 - Índice de secagem

#### 6.4.5 Porosidade aberta

A porosidade aberta foi obtida conforme o procedimento descrito na secção 5.7.5, cujos resultados são apresentados na figura 6.15.

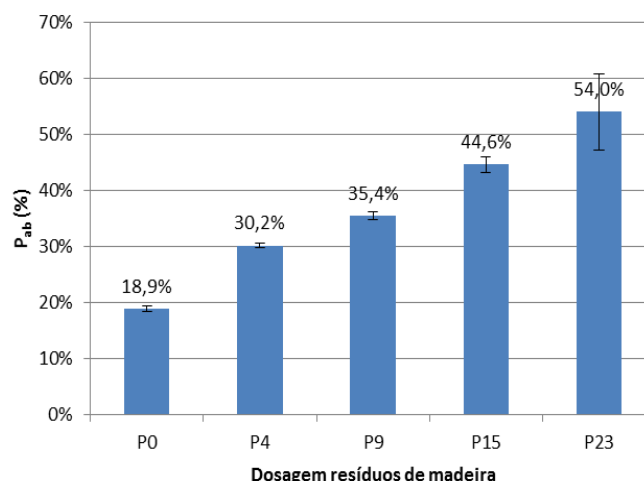


Figura 6.15 - Resultados do ensaio de porosidade aberta

É facilmente observado que todas as argamassas possuem um valor de porosidade aberta superior ao valor da argamassa de referência. Conforme expectável, devido a ser visualmente perceptível, existe um aumento da porosidade aberta proporcional ao aumento da percentagem de pellets introduzida nas argamassas, sendo a mistura P<sub>23</sub> aquela que possui o valor mais elevado.

Comparando os resultados das argamassas com pellets com a argamassa de referência vemos que a substituição de 4% de areia por pellets provoca um aumento na porosidade aberta de 11 %, e para a substituição de 9% a porosidade aberta aumenta cerca de 17 %. Com a incorporação de 15% e 23% de pellets, o valor de porosidade aberta sobre um aumento mais acentuado de 26% e 35%, respetivamente.

Assim sendo, em síntese, pode-se afirmar que a incorporação de pellets nas argamassas provoca um aumento na porosidade aberta, ou seja, dos poros em contacto com o exterior.

## 6.5 Correlações entre as diferentes propriedades

Nesta secção é realizada uma simples correlação entre as diversas propriedades obtidas nos ensaios realizados, de forma a aferir a influência que cada uma tem no comportamento das argamassas, e também, como se relacionam entre si.

### 6.5.1 Porosidade aberta/massa volúmica

Na figura 6.16 temos os resultados obtidos de massa volúmica e porosidade aberta.

Ao fazermos uma comparação da massa volúmica com a porosidade aberta, verifica-se que estas propriedades variam numa proporcionalidade inversa, ou seja, com o aumento da porosidade aberta existe um decréscimo na massa volúmica da argamassa.

Sendo a porosidade aberta a percentagem de poros presentes na argamassa com acesso ao exterior torna esta tendência bastante intuitiva. Sabendo que uma argamassa com elevada percentagem de porosidade aberta é uma argamassa com um grande número de poros com acesso ao exterior, ao mesmo tempo também significa que esta argamassa terá um menor valor de massa volúmica, por ter um grande número de poros no seu interior.

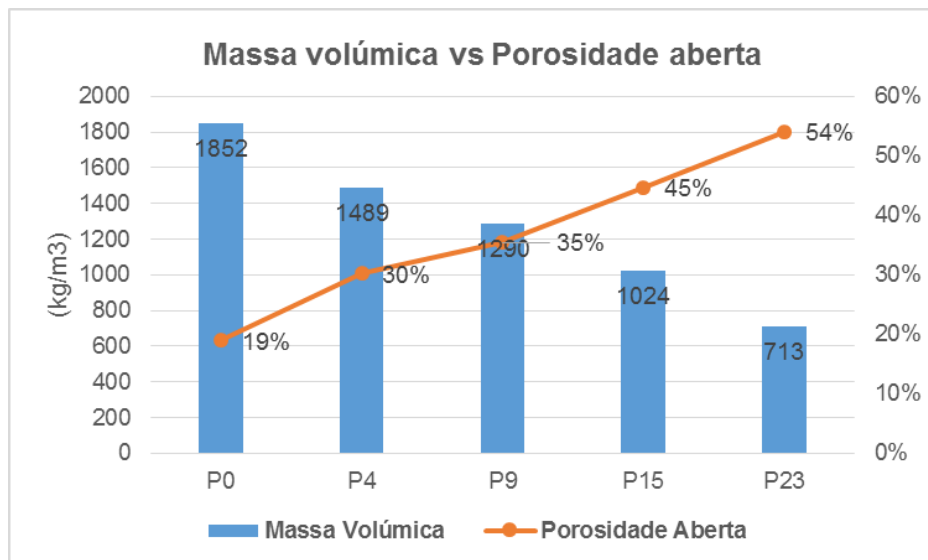


Figura 6.16 - Correlação entre a massa volúmica e porosidade aberta

## 6.5.2 Massa volúmica/condutibilidade térmica

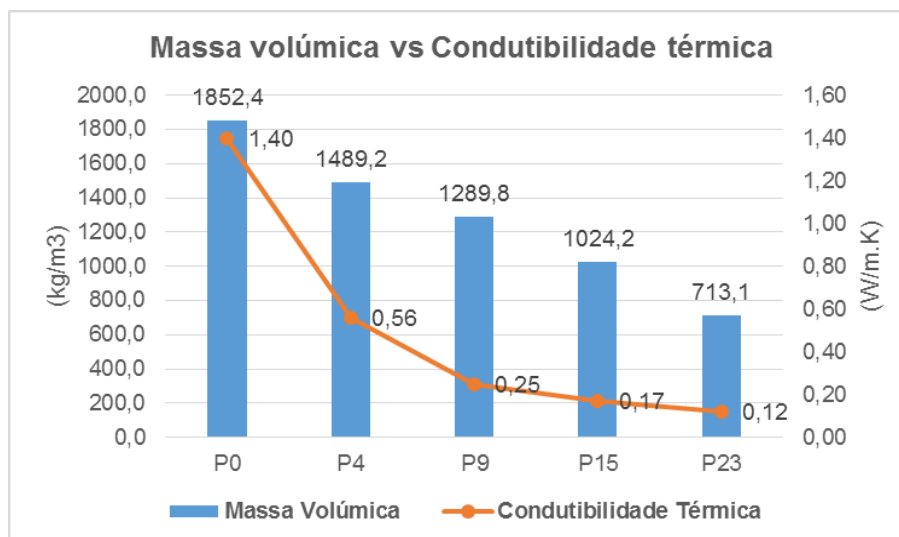


Figura 6.17 - Correlação entre massa volúmica e condutibilidade térmica

Na figura 6.17 está representado a combinação entre os resultados do ensaio de massa volúmica e os resultados do ensaio de condutibilidade térmica para cada uma das argamassas produzidas.

Observando a figura nota-se que existe um decréscimo da condutibilidade térmica com o decréscimo da massa volúmica das argamassas, ou seja, com o aumento da percentagem de pellets presentes nas argamassas.

Em termos gerais, um material é tanto mais isolante térmico (com condutibilidade térmica reduzida) quanto maior for a sua porosidade, ou seja quanto mais elevada for a quantidade de ar no interior da microestrutura (Henriques 2011).

Sendo assim, havendo um decréscimo da massa volúmica com o aumento da porosidade aberta, é natural que exista ao mesmo tempo um decréscimo da condutibilidade térmica com o decréscimo da massa volúmica.

### 6.5.3 Absorção de água por capilaridade/Porosidade aberta

Na figura 6.18 pode-se encontrar a relação entre a absorção de água por capilaridade e a porosidade aberta, mais especificamente, entre o valor assintótico e a porosidade aberta.

Olhando para a figura 6.18 observamos que o aumento da porosidade aberta (devido ao aumento da dosagem de pellets) provoca um aumento no valor assintótico, excetuando para a argamassa P<sub>23</sub>, que sofre um ligeiro decréscimo.

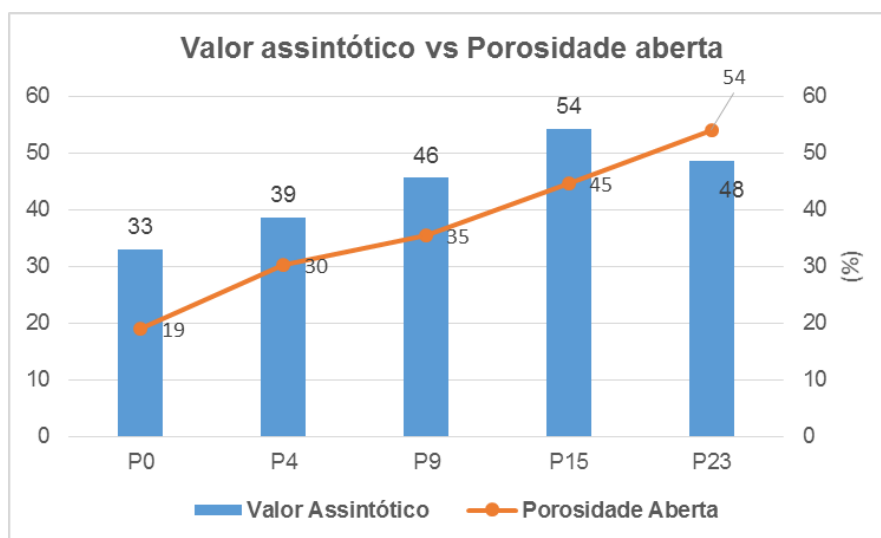


Figura 6.18 - Correlação entre absorção de água por capilaridade e porosidade aberta

Ora os dois valores são naturalmente dependentes um do outro, sendo o valor assintótico o valor máximo de água que a argamassa pode absorver, e sendo a água absorvida pelos poros presentes da argamassa, pode concluir-se que quanto maior porosa for uma argamassa maior será a quantidade de água absorvida pela mesma.

### 6.5.4 Secagem/Porosidade aberta

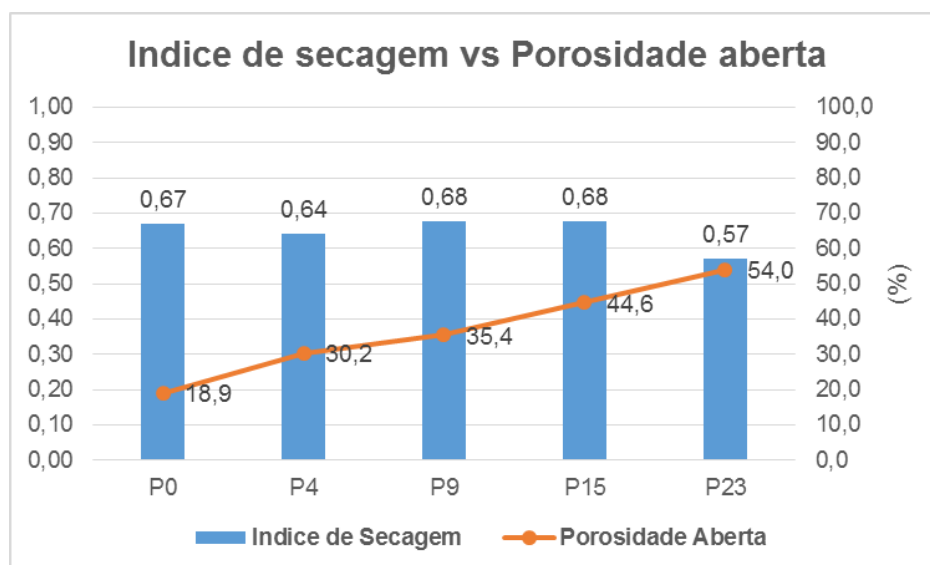


Figura 6.19 - Correlação entre o índice de secagem e a porosidade aberta

Encontra-se na figura 6.19, a relação entre o índice de secagem (obtido através das curvas de secagem) e a porosidade aberta.

Analisando os resultados apresentados nesta figura, verifica-se que a variação do índice de secagem com o aumento da porosidade aberta, até introdução de 15 % de pellets, é praticamente constante. No entanto existe um decréscimo significativo para a argamassa P<sub>23</sub>, que possui um valor de P<sub>ab</sub> = 54 %.

Ora esta tendência pode evidenciar que a partir de certo valor de porosidade aberta, haverá a tendência para o melhoramento da secagem da argamassa, ou seja para a diminuição do seu índice de secagem. Pelos resultados obtidos pode-se supor que este valor se situará perto dos 50 % de porosidade aberta, ou seja a partir de cerca de 20 % de substituição de pellets de madeira por areia.

## 6.6 Síntese do capítulo

Tendo apresentado todos os resultados e feito uma análise crítica dos mesmos, segue-se uma síntese de todos os resultados para uma melhor percepção das características das argamassas produzidas. Sendo assim no quadro seguinte apresenta-se um resumo dos resultados obtidos.

Quadro 6.5 - Quadro síntese

Características Físicas - Quadro Síntese							
Mistura	Massa Volúmica (Kg/m <sup>3</sup> )	Condutibilidade Térmica (W/m.K)	Absorção de água por capilaridade		Secagem		Porosidade Aberta (%)
			CC	VA	IS	TS	
P <sub>0</sub>	1852	1,4	0,96	33,0	0,67	0,06	18,9
P <sub>4</sub>	1489	0,56	0,65	38,7	0,64	0,08	30,2
P <sub>9</sub>	1290	0,25	0,59	45,6	0,68	0,07	35,4
P <sub>15</sub>	1024	0,17	1,77	54,2	0,68	0,08	44,6
P <sub>23</sub>	713	0,12	2,22	48,5	0,57	0,11	54,0

## 7 Apresentação e discussão dos resultados de simulação numérica – *EnergyPlus*

### 7.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes às simulações numéricas efetuadas. Numa primeira fase, será caracterizado o cenário inicial, designado solução base, relativamente às perdas térmicas das envolventes opacas e às perdas térmicas pelos vãos envidraçados. Seguidamente irá ser analisado como as diversas melhorias realizadas contribuem para a alteração das perdas energéticas.

Numa segunda fase, a solução base irá ser caracterizada consoante as necessidades energéticas anuais (de aquecimento e arrefecimento) e posteriormente irá ser avaliado de que forma as soluções de melhoria irão afetar os valores das necessidades energéticas iniciais.

Ainda neste capítulo irá ser dado ênfase à problemática das condensações superficiais e internas, para a solução inicial e para as soluções de melhoria.

Por fim, foi realizada uma avaliação financeira de todas as soluções construtivas.

### 7.2 Perdas Térmicas

#### 7.2.1 Cenário Inicial – Solução Base

Foi caracterizada a solução base relativamente às perdas térmicas que esta apresenta ao longo do ano. Os principais elementos analisados foram a envolvente opaca vertical (zona corrente e zona de ponte térmica plana), cobertura e pavimento.

Quadro 7.1 - Perdas Térmicas pela Envolvente Opaca

Elemento	Perdas Térmicas (W)	Perda Total (W)
Zona Corrente	802	2907
Pontes Térmicas	508	
Cobertura	771	
Pavimento	312	

As soluções construtivas constituintes da solução base foram caracterizadas anteriormente na secção 4.6.5.

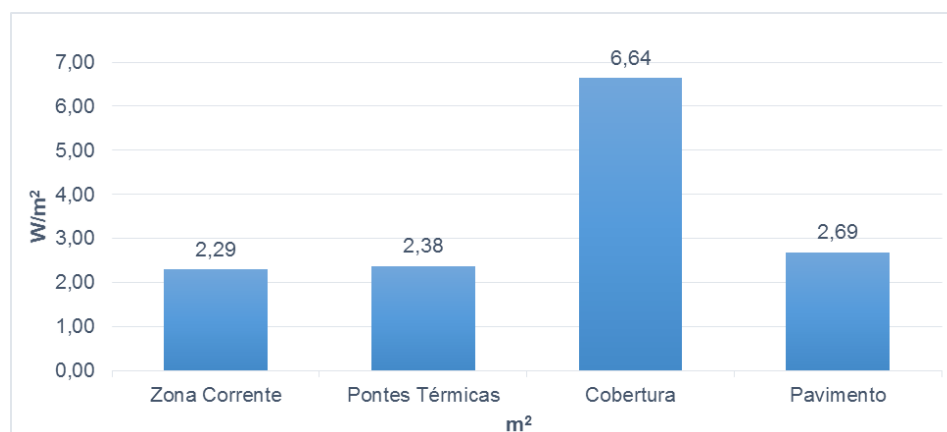


Figura 7.1 -Perdas térmicas por área - Envolvente Opaca

No quadro 7.1 apresentam-se os valores das perdas térmicas anuais da envolvente opaca, obtidos através da simulação energética realizada. Na figura 7.1 são apresentadas as perdas térmicas da envolvente opaca por área.

Analisando o quadro apresentado verifica-se que o elemento que possui o valor mais elevado de perdas térmicas é a zona corrente, constituindo quase 30 % das perdas da envolvente opaca. O segundo elemento que apresenta maiores perdas é a cobertura, representando 24% do valor total. Devido ao elevado valor obtido para a cobertura, definiram-se soluções de melhoria, com implementação de argamassas P<sub>23</sub> na camada de forma da cobertura.

Observando as perdas térmicas por área, constata-se facilmente que o elemento que possui um maior valor de perdas por área é a cobertura, sendo bastante superior aos restantes. Estes dados confirmam a necessidade de se estudarem soluções de cobertura com incorporação de argamassas com desempenho térmico melhorado, de modo a diminuir as perdas térmicas por este elemento.

As perdas relativas aos vãos envidraçados, também foram contabilizadas. No entanto, devido a não se alterar a solução de vãos envidraçados, apenas se irão apresentar as perdas deste elemento para a solução base, de modo a caracteriza-la.

Quadro 7.2 - Perdas térmicas: Solução base - Envolvente Opaca + Vãos Envidraçados

Elemento	Perdas Térmicas (W)	Perda Total (W)
Zona Corrente	802	2907
Pontes Térmicas	508	
Cobertura	771	
Pavimento	312	
Vãos Envidraçados	514	

No quadro 7.2 apresentam-se os valores das perdas térmicas anuais da envolvente opaca e dos vãos envidraçados. Na figura 7.2 são apresentadas as perdas térmicas da envolvente opaca + vãos envidraçados por área.

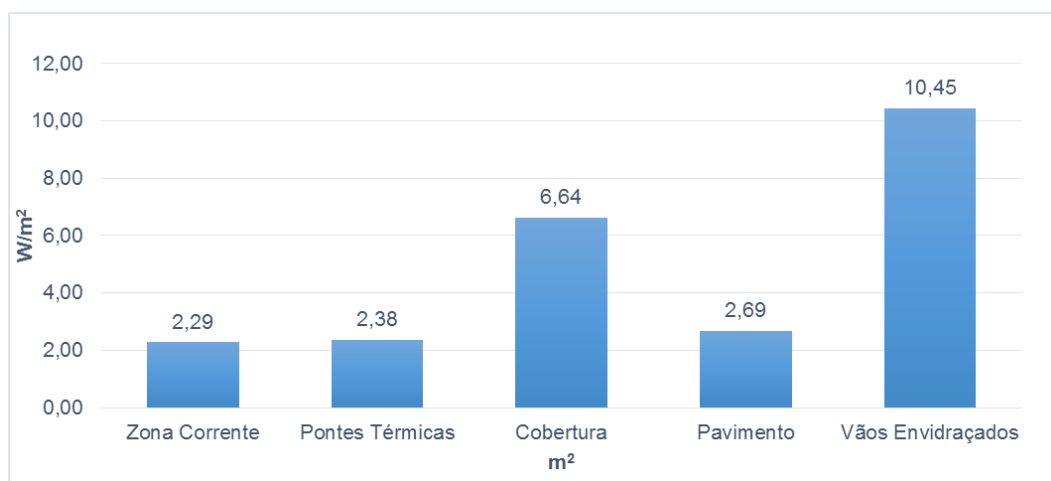


Figura 7.2 - Perdas térmicas por área: Solução Base - Envolvente Opaca + Vãos Envidraçados

## 7.2.2 Soluções de melhoria com 4% de Pellets

Nesta secção são abordadas as soluções de melhoria que consistem na aplicação da argamassa P<sub>4</sub> na envolvente opaca exterior (zona corrente e pontes térmicas planas), em várias espessuras,



nomeadamente 4, 6 e 8 cm. Foram então realizadas simulações de modo a avaliar a contribuição destas melhorias na diminuição das perdas térmicas.

No quadro 7.3 são apresentados os valores referentes às perdas térmicas pela envolvente opaca exterior, referentes às diferentes espessuras de aplicação de argamassas com 4 % de pellets de madeira. Na figura 7.3 apresentam-se as perdas térmicas por área.

Quadro 7.3 - Perdas térmicas – Melhorias 4 % Pellets - Envolvente Opaca

Espessura	Elemento	Perdas Térmicas (W)	Perda Total (W)	Percentagens (%)
4 cm	Zona Corrente	761	2308	33%
	Pontes Térmicas	452		20%
	Cobertura	780		34%
	Pavimento	314		14%
6 cm	Zona Corrente	727	2246	32%
	Pontes Térmicas	416		19%
	Cobertura	787		35%
	Pavimento	316		14%
8 cm	Zona Corrente	695	2190	32%
	Pontes Térmicas	386		18%
	Cobertura	793		36%
	Pavimento	316		14%

Analisando os resultados obtidos verifica-se, conforme esperado, que a solução com a espessura de argamassa de 8 cm é aquela que promove uma redução maior nas perdas térmicas. Quando comparada com a solução base, a solução com 4 cm de espessura traduz-se na diminuição de cerca de 21 %. Aumentando a espessura em 2 cm, a diminuição traduz-se em cerca de 23 % e para os 8 cm espessura obtêm-se uma redução de 25 % das perdas térmicas.

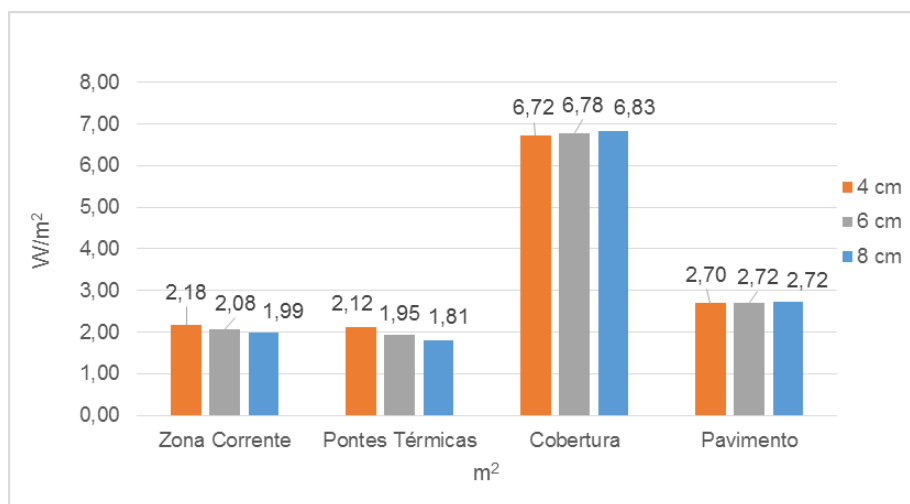


Figura 7.3 - Perdas térmicas - Melhorias 4 % pellets

Observando a percentagem que cada elemento opaco contribui nas perdas térmicas, verifica-se que a maior percentagem é provocada pela cobertura (34-36%), de seguida pela zona corrente (32-33%), pelas pontes térmicas (18-20%) e por fim pelo pavimento (14%).

No entanto se as perdas térmicas forem analisadas por área, denota-se que a cobertura é o elemento que contribui em maior quantidade para as perdas, sendo seguido pelo pavimento, em seguida pela zona corrente e por fim pelas pontes térmicas.

Comparando os valores das melhorias com a solução base, verifica-se que as áreas intervencionadas são aquelas que sofrem reduções nas perdas, sendo que a zona corrente sofre uma redução de 5 a 13 % e as pontes térmicas de 11 a 24 %. A cobertura sofre um incremento nas perdas de cerca de 3 %

(para a maior espessura) e o pavimento não tem um aumento significativo, mantendo-se praticamente constante.

### 7.2.3 Soluções de melhoria com 9% de Pellets

De uma maneira semelhante à secção anterior, irão ser apresentados referentes às perdas térmicas no edifício com a aplicação da argamassa P<sub>9</sub>, em várias espessuras, na envolvente opaca exterior, nomeadamente na zona corrente e nas pontes térmicas.

No quadro 7.4 apresentam-se os resultados obtidos, as perdas térmicas totais e as perdas térmicas por elemento. Na figura 7.4 são apresentadas as perdas térmicas que se obtiveram para cada elemento, por área.

Quadro 7.4 - Perdas térmicas – Melhorias 9 % Pellets

Espessura	Elemento	Perdas Térmicas (W)	Perda Total (W)	Percentagens (%)
4 cm	Zona Corrente	691	2177	32%
	Pontes Térmicas	374		17%
	Cobertura	795		37%
	Pavimento	317		15%
6 cm	Zona Corrente	638	2088	31%
	Pontes Térmicas	325		16%
	Cobertura	806		39%
	Pavimento	319		15%
8 cm	Zona Corrente	593	2018	29%
	Pontes Térmicas	290		14%
	Cobertura	815		40%
	Pavimento	321		16%

Analisando os dados obtidos, de uma forma global, verifica-se um decréscimo mais elevado das perdas térmicas (quando comparados com as soluções da secção anterior). Conforme esperado, a aplicação de um reboco com uma espessura de 8 cm, é a que provoca uma maior redução, com cerca de 30%. A solução com 6 cm provoca reduções em 28 %, enquanto que a solução com menor espessura provoca uma diminuição de 25% das perdas térmicas.

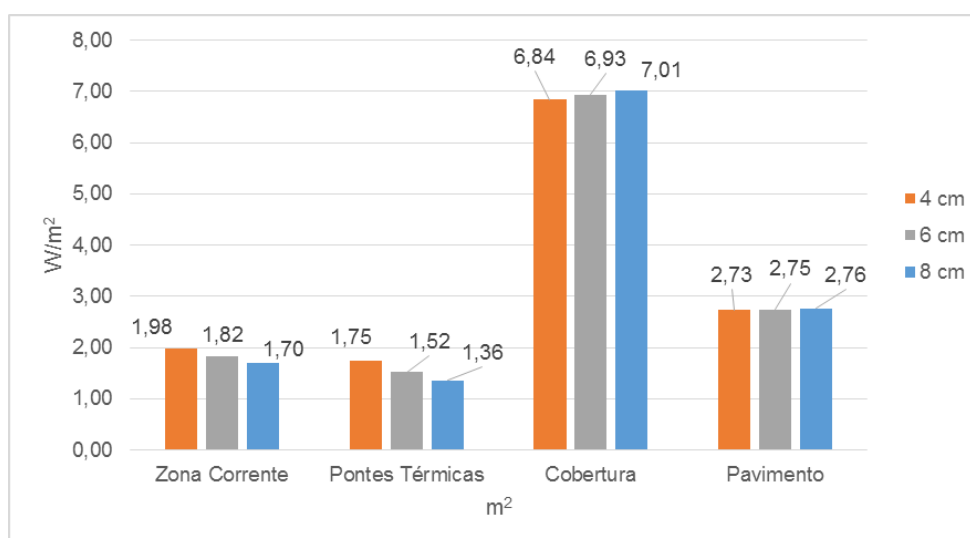


Figura 7.4 - Perdas térmica - Melhorias 9 % de pellets

Com a implementação de uma camada de reboco termicamente mais eficiente, verificou-se um incremento nas perdas térmicas dos elementos não intervencionados, ou seja da cobertura e do pavimento, sendo este aumento, mais acentuado na cobertura. Verifica-se uma tendência para a redução das perdas nas zonas intervencionadas, que vai sendo mais acentuada com o aumento da utilização de pellets nas argamassas.

Observando as perdas por área, verificam-se resultados semelhantes aos da secção anterior, em que a cobertura é o elemento que apresenta maior valor de perdas térmicas, tendo tendência, em aumentar com o aumento da espessura de argamassa aplicada nas fachadas.

Comprando estes valores com a solução base, existiu uma redução de 13 a 26% (consoante a espessura da camada aplicada) para a zona corrente e de 26-42 % para as pontes térmicas.

## 7.2.4 Soluções de melhoria com 15 % de pellets

Estas melhorias consistem na aplicação da argamassa P<sub>15</sub> nas paredes das fachadas do edifício, nomeadamente na zona corrente e nas pontes térmicas. Foram realizadas simulações térmicas de modo a avaliar as perdas térmicas, sendo apresentadas em seguida.

No quadro 7.5 apresentam-se as perdas térmicas globais, bem com as perdas térmicas por elemento. Na figura 7.5 estão representados as perdas por área.

*Quadro 7.5 - Perdas térmicas - Melhorias 15 % pellets*

Espessura	Elemento	Perdas Térmicas (W)	Perda Total (W)	Percentagens (%)
4 cm	Zona Corrente	645	2096	31%
	Pontes Térmicas	328		16%
	Cobertura	805		38%
	Pavimento	319		15%
6 cm	Zona Corrente	584	1999	29%
	Pontes Térmicas	278		14%
	Cobertura	817		41%
	Pavimento	321		16%
8 cm	Zona Corrente	534	1924	28%
	Pontes Térmicas	242		13%
	Cobertura	824		43%
	Pavimento	323		17%

Observando as perdas globais, pode-se verificar que, com a implementação das soluções com 15 % de pellets, as reduções em termos de perdas energéticas começam a tornar-se bastante significativas. Para uma espessura de 4 cm ocorre uma redução nas perdas térmicas de cerca de 28 %, para 6 cm cerca de 31 % e para 8 cm, 33 %.

Relativamente à contribuição de cada um dos elementos, a estrutura mantém-se, ocorrendo uma diminuição para os elementos intervencionados (mais acentuada para as pontes térmicas), e um aumento para os outros elementos (mais acentuado na cobertura).

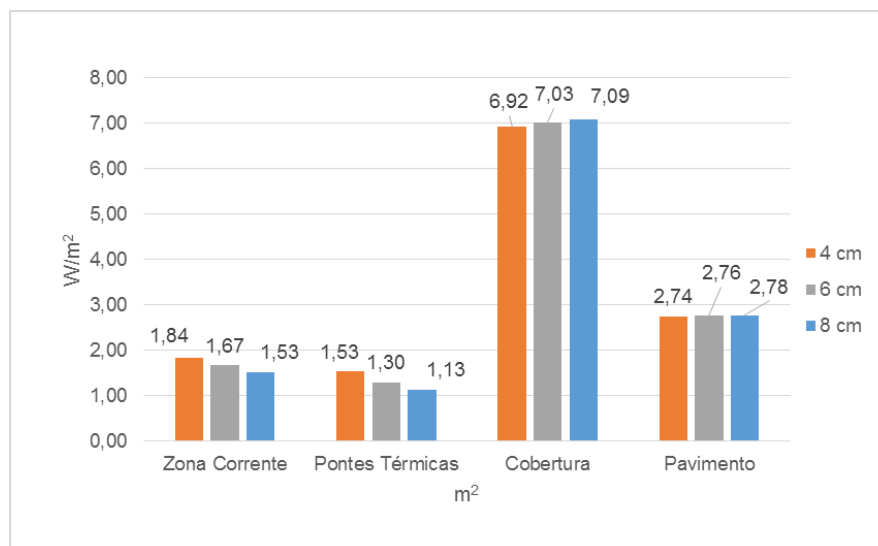


Figura 7.5 - Perdas térmicas por área – Melhoria 15 % pellets

Analisando os valores por área, ocorre uma redução de 19 a 33 % para a zona corrente e de 35 a 52 % para as pontes térmicas (em relação aos valores obtidos para a solução base). Para a cobertura ocorre um aumento de 4 a 6 % e para o pavimento de 2 a 3 %.

## 7.2.5 Soluções de melhoria com 23 % de Pellets

Este grupo de soluções traduzem-se na aplicação da argamassa P<sub>23</sub>, em 4, 6 e 8 cm, na envolvente opaca exterior, nomeadamente na zona corrente e nas pontes térmicas. No quadro 7.6 apresentam-se as perdas térmicas globais e as perdas térmicas por elemento. Na figura 7.6 são apresentadas as perdas térmicas por área.

Quadro 7.6 – Perdas Térmicas – Melhorias 23 % pellets

Espessura	Elemento	Perdas Térmicas (W)	Perda Total (W)	Percentagens (%)
4 cm	Zona Corrente	596	2015	30%
	Pontes Térmicas	284		14%
	Cobertura	814		40%
	Pavimento	321		16%
6 cm	Zona Corrente	530	1916	28%
	Pontes Térmicas	235		12%
	Cobertura	827		43%
	Pavimento	323		17%
8 cm	Zona Corrente	480	1845	26%
	Pontes Térmicas	204		11%
	Cobertura	837		45%
	Pavimento	325		18%

Em relação às perdas térmicas totais, estas melhorias, mostram ser bastante efetivas, permitindo reduções bastante significativas. Para a aplicação da argamassa P<sub>23</sub> com 4 cm de espessura, as simulações mostraram uma redução de cerca de 31 %, para 6 cm uma redução de 34% e para 8cm as perdas diminuíram em 36 %.

À semelhança das soluções anteriores, a cobertura constitui o elemento com mais influência nas perdas, atingindo os valores mais elevados, nestas soluções. Isto mostra que é necessário conjugar a aplicação das argamassas com pellets de madeira, não só nas paredes exteriores, mas também na cobertura, nomeadamente, na camada de enchimento, de maneira a tornar mais efetivas as reduções das perdas térmicas (e consequentemente as necessidades energéticas).

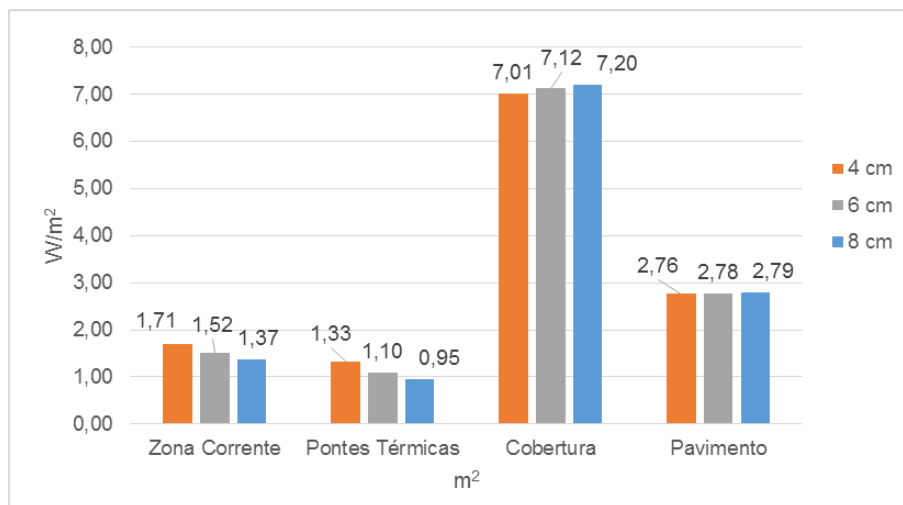


Figura 7.6 - Perdas térmicas por área - Melhoria 23% pellets

Nas perdas térmicas por área, relativamente ao cenário inicial, ocorre uma redução de 25 a 40 % para a zona corrente e de 44 a 59% para as pontes térmicas.

## 7.2.6 Soluções de melhoria composta: Pellets 23 % + Pellets 4 %

Foi observado, durante a campanha experimental (caracterizada no capítulo 5) que alguns dos provetes da argamassa P<sub>23</sub> não possuíam grande coesão, evidenciando um comportamento muito frível. Ora, um dos requisitos fundamentais das argamassas para rebocos é a sua aderência ao suporte, e por isso para maiores espessuras a aplicação de argamassas com 23 % de pellets de madeira, poderá não ser viável.

De modo a combater essa particularidade estudou-se a utilização de uma camada de reboco composta, ou seja, constituída por uma camada interior de argamassa P<sub>23</sub> e uma camada superficial de argamassa P<sub>4</sub>, formando assim uma solução de reboco mais coesa e ao mesmo tempo com boas propriedades térmicas.

As perdas térmicas foram também estudadas na aplicação desta argamassa composta para 6 cm e 8 cm de espessura. Considerou-se que para 4 cm de espessura a argamassa P<sub>23</sub> possui coesão suficiente, não sendo necessário utilizar uma solução composta.

No quadro 7.7 encontram-se os resultados correspondentes às perdas globais e às perdas por elemento. Na figura 7.7 encontram-se as perdas por área.

Quadro 7.7 - Perdas térmicas - Melhoria composta

Espessura	Elemento	Perdas Térmicas (W)	Perda Total (W)	Percentagens (%)
6 cm	Zona Corrente	551	1948	28%
	Pontes Térmicas	252		13%
	Cobertura	823		42%
	Pavimento	322		17%
8 cm	Zona Corrente	514	1895	27%
	Pontes Térmicas	227		12%
	Cobertura	830		44%
	Pavimento	324		17%

Em termos de perdas globais e dos elementos com mais influências nas mesmas, os valores das soluções compostas são praticamente semelhantes aos valores das melhorias com argamassa P<sub>23</sub>, para as mesmas espessuras.

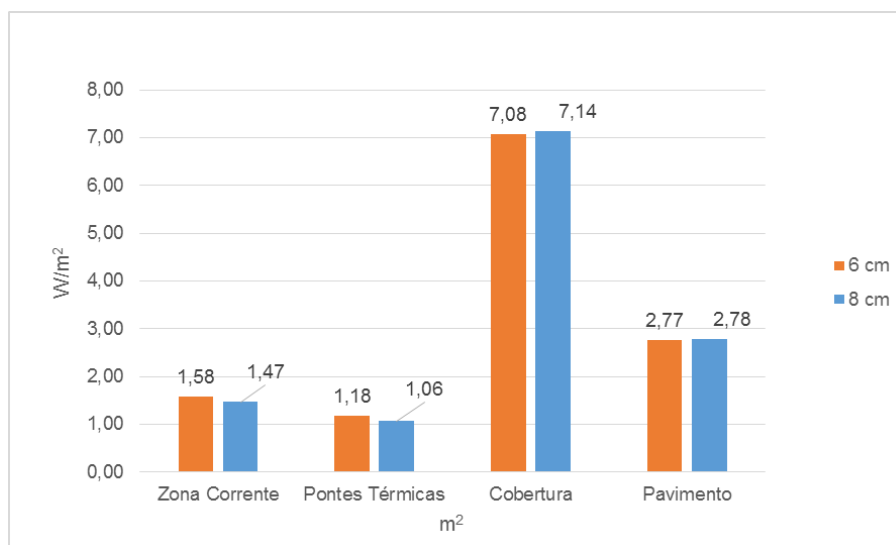


Figura 7.7 - Perdas térmicas - Melhorias compostas

Observando as perdas por área e comparando estes valores com os das soluções anteriormente referida verifica-se que apesar de a solução homogênea apresentar melhores valores, as soluções compostas apresentam valores bastante semelhantes, não havendo diferenças significativas.

### 7.2.7 Soluções de melhoria com 23% de Pellets: Cobertura

Tendo em conta os resultados obtidos nas soluções anteriores, e da grande contribuição da cobertura nas perdas térmicas, foi estudada uma solução de melhoria, com aplicação da argamassa P<sub>23</sub> na camada de forma da cobertura. Nesta solução a cobertura constitui o único elemento intervencionado, de modo a avaliar de que forma, uma intervenção neste elemento afeta as perdas globais do edifício.

Deste modo, no quadro 7.8, estão apresentadas as perdas globais e as perdas por elemento, e na figura 7.8 as perdas por área.

Analisando os resultados verifica-se que a intervenção na cobertura constitui uma boa melhoria, na medida em que existe uma redução de 30 % das perdas globais em relação ao cenário inicial.

Quadro 7.8 - Perdas térmicas - Melhoria pellets 23%: Cobertura

Espessura	Elemento	Perdas Térmicas (W)	Perda Total (W)	Percentagens (%)
4 cm	Zona Corrente	836	2060	41%
	Pontes Térmicas	529		26%
	Cobertura	377		18%
	Pavimento	318		15%

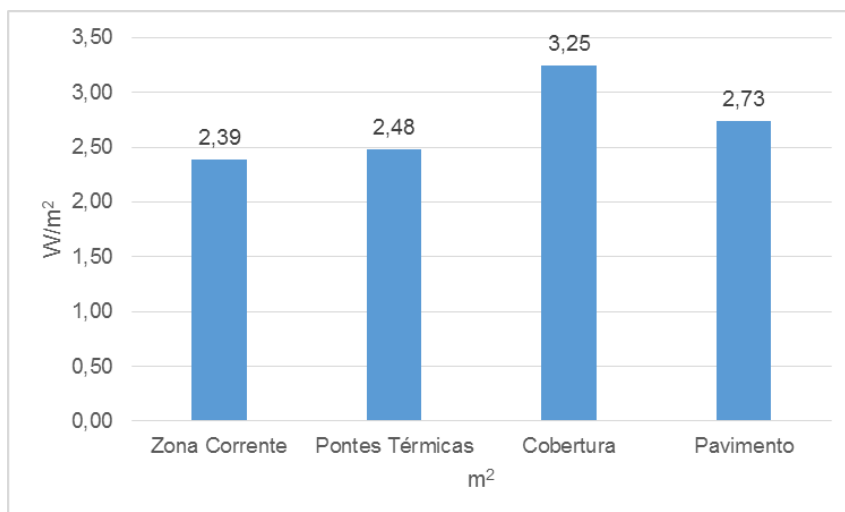


Figura 7.8 - Perdas térmicas. Melhoria 23 % pellets: Cobertura

Como seria de esperar, neste cenário, o elemento que contribui mais para os ganhos deixa de ser a cobertura passando a ser a zona corrente, sendo seguido das pontes térmicas. No entanto as reduções na cobertura são bastante significativas, passando de 27 % (valor do cenário inicial) para 18 %.

Observando os resultados obtidos em relação às perdas por área, verifica-se que esta solução é bastante eficaz, na medida em que existe uma redução de 50 % das perdas em relação ao cenário inicial.

Visto terem sido obtidos resultados bastante favoráveis à utilização de pellets de madeira em coberturas, foi estudada também uma solução de melhoria intervencionando os três elementos principais: a zona corrente, pontes térmicas e cobertura.

### 7.2.8 Soluções de melhoria com 23 % de Pellets: Zona corrente, pontes térmicas e cobertura

O último cenário de melhorias apresentado, consiste na aplicação da argamassa P<sub>23</sub> nas zonas que mais contribuem para as perdas, ou seja, nas paredes exteriores (zona corrente + pontes térmicas) e na cobertura. Esta aplicação é feita mediante espessuras de argamassa diferentes, nomeadamente, 4, 6 e 8 cm.

No quadro 7.9 apresentam-se os valores relativos às perdas globais e na figura 7.9 estão retratados as perdas por área.

Quadro 7.9 - Perdas térmicas - Melhorias 23 % pellets: ZC+ PTP + Cobertura

Espessura	Elemento	Perdas Térmicas (W)	Perda Total (W)	Percentagens (%)
4 cm	Zona Corrente	626	1653	38%
	Pontes Térmicas	299		18%
	Cobertura	400		24%
	Pavimento	328		20%
6 cm	Zona Corrente	558	1544	36%
	Pontes Térmicas	248		16%
	Cobertura	407		26%
	Pavimento	331		21%
8 cm	Zona Corrente	506	1465	35%
	Pontes Térmicas	214		15%
	Cobertura	412		28%
	Pavimento	333		23%

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que estes foram bastante satisfatórios. Conjugando intervenções nas paredes exteriores e na cobertura, com recurso a argamassas com 23 % de pellets, as reduções a nível das perdas energéticas são bastante elevadas. Aliás, para uma espessura de reboco de 4 cm ocorre uma diminuição de 43%, para 6 cm de espessura 47 % e para 8 cm reduções de 50 %.

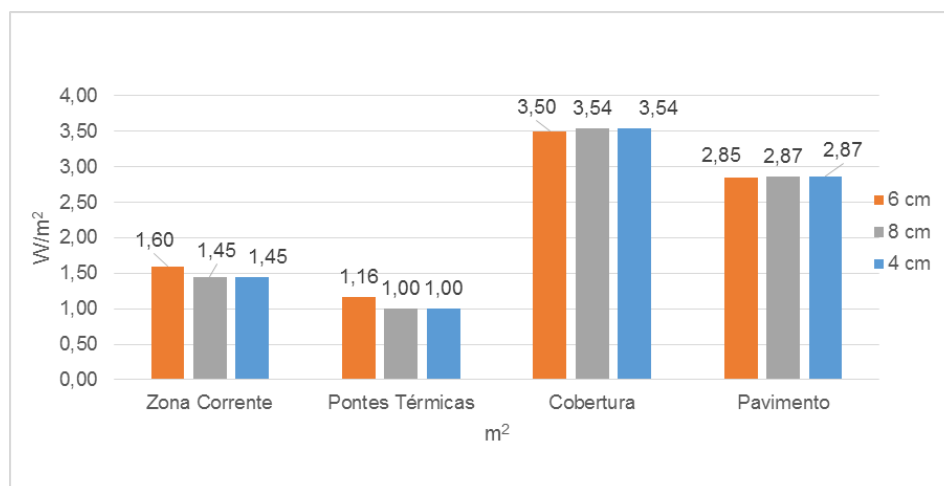


Figura 7.9 - Perdas térmicas: Melhorias 23 % pellets - ZC + PTP + Cobertura

Estes valores constituem os valores mais elevados em termos de redução de perdas energéticas, o que, poderá significar que este conjunto de melhorias serão os que possuirão valores mais reduzidos em termos de necessidades energéticas, visto, que estes dois conceitos estão relacionados.

Em termos de contribuição para as perdas, verifica-se que com esta solução o elemento que provoca mais perdas é a zona corrente, sendo seguido da cobertura, do pavimento e das pontes térmicas. Ou seja, o “cenário” verificado na maioria das soluções vistas anteriormente é alterado, destacando a passagem das pontes térmicas para elemento que menos perdas apresenta.

Analisando mais detalhadamente, em termos de perdas por área, verifica-se que ocorreu uma redução de 22 a 37 % para a zona corrente, de 41 a 57 % para as pontes térmicas, 46 a 48 % na cobertura e um aumento de 5 a 6 % no pavimento.

### 7.3 Necessidades energéticas

De seguida serão apresentadas as necessidades energéticas de aquecimento e de arrefecimento, obtidas através das simulações realizadas.

Os resultados obtidos foram divididos consoante a espessura da argamassa aplicada nas fachadas do edifício. O caso inicial, solução base, será apresentado em conjunto com todos os resultados, de maneira a facilitar a comparação entre as soluções de melhoria e o caso inicial.



### 7.3.1 Necessidades de aquecimento – Soluções de melhorias com 4 cm de espessura

Na figura 7.10 estão representadas as necessidades energéticas de aquecimento para a solução base e para cada uma das soluções de melhoria, com uma espessura de reboco de 4 cm, bem como a poupança de energia que cada uma provoca.

Observando os resultados obtidos, verificamos que estes estão de acordo com as perdas energéticas apresentadas, na medida em que as soluções que apresentam um maior valor de perdas energéticas são aquelas que apresentam um valor mais elevado de necessidades energéticas de aquecimento.

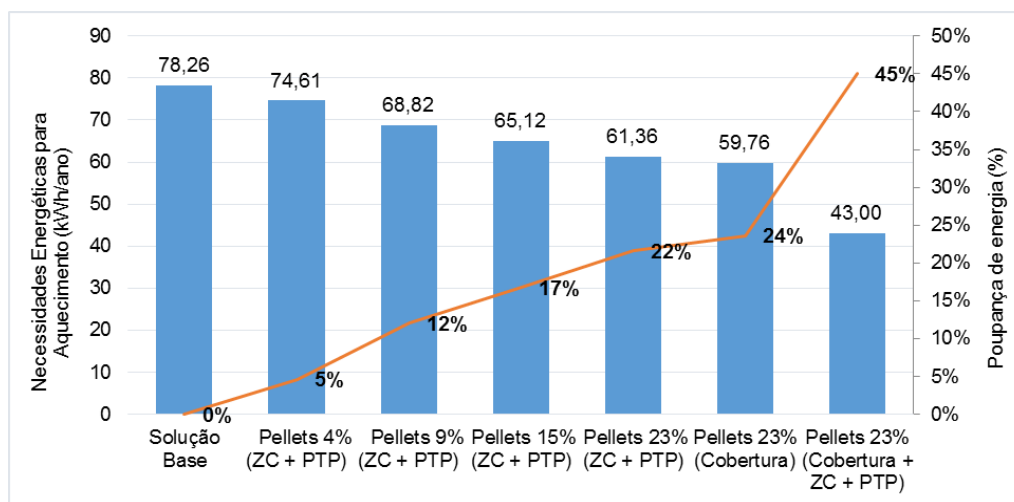


Figura 7.10 - Necessidades energéticas de aquecimento - Espessuras a 4 cm

Analisando os resultados obtidos verifica-se que o aumento da dosagem de pellets de madeira na argamassa provoca uma diminuição nas necessidades energéticas do edifício. As necessidades seguem uma progressão, mais ou menos constante e é possível obter uma poupança de 22 %, aplicando a argamassa com maior dosagem de pellets ( $P_{23}$ ), somente na zona corrente e pontes térmicas do edifício.

Os resultados mostram também, que uma intervenção com recurso a pellets de madeira apenas na cobertura se traduz bastante efetiva, havendo uma redução de 24 % da energia.

No entanto, como era esperado os melhores resultados são obtidos quando os três elementos principais são intervencionados (ZC + PTP + Cobertura), obtendo uma redução de 45 % nas necessidades energéticas.

### 7.3.2 Necessidades de arrefecimento – Soluções de melhoria com 4 cm de espessura

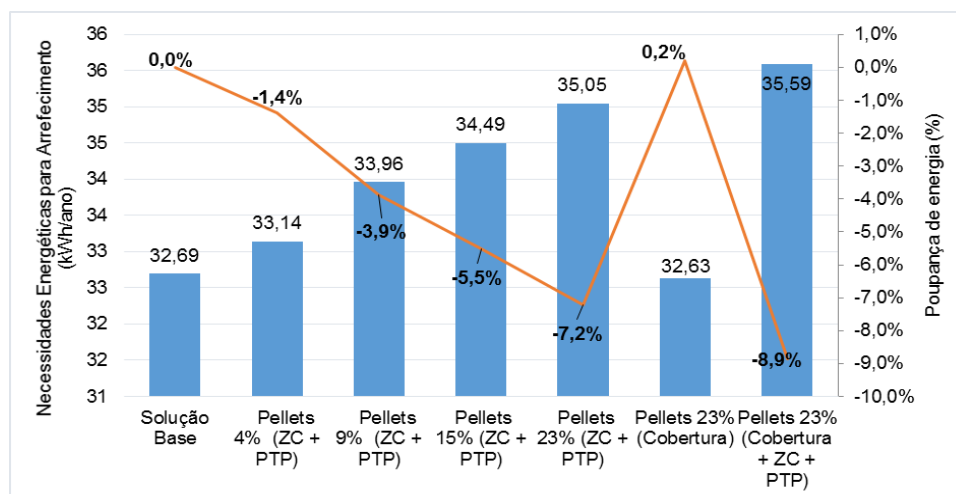


Figura 7.11 - Necessidades energéticas de arrefecimento - Espessuras a 4 cm

Na figura 7.11 apresentam-se os resultados às necessidades energéticas de arrefecimento.

Observando os resultados obtidos verifica-se, de um modo geral, um aumento das necessidades para todas as soluções, sendo este aumento maior para as soluções com dosagem mais elevada de pellets de madeira (excetuando a solução em que apenas a cobertura é intervencionada).

No entanto este aumento não é muito significativo (atingindo um máximo de cerca de 9%), não constituindo um motivo para a inviabilidade das soluções, visto que as reduções nas necessidades energéticas de aquecimento, compensam estes aumentos.

### 7.3.3 Necessidades de aquecimento – Melhorias com 6 cm de espessura

Na figura 7.12 apresentam-se os resultados referentes aos resultados obtidos para as necessidades energéticas de aquecimento, para as melhorias com 6 cm de espessura.

Os resultados apresentam a mesma tendência que os resultados com 4 cm de espessura, no entanto com valores mais reduzidos.

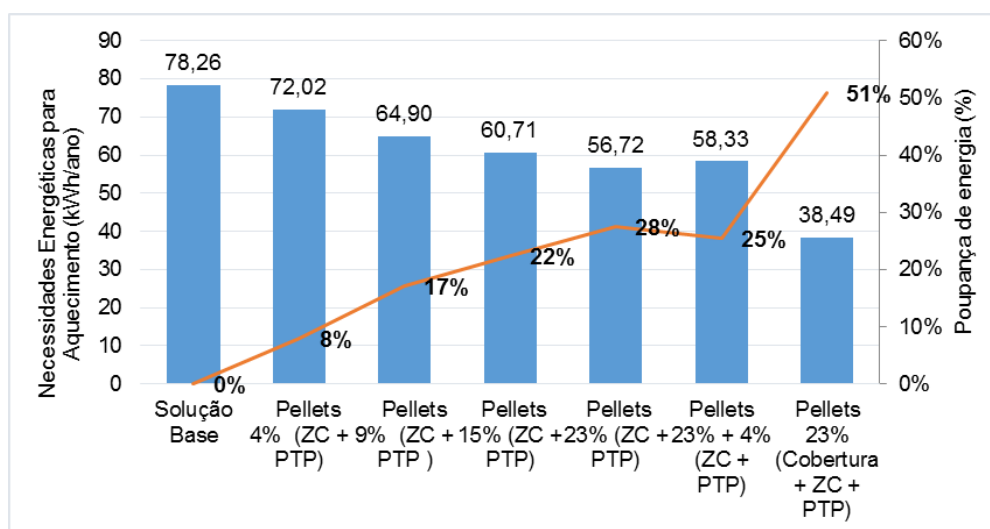


Figura 7.12 - Necessidades energéticas de aquecimento - Espessuras a 6 cm

Neste conjunto de soluções destaca-se a melhoria com aplicação de argamassa P<sub>23</sub> na cobertura, zona corrente e pontes térmicas, que atinge uma poupança de energia de 51 %.

É de referir também a semelhança entre a solução com pellets a 23 %, aplicados na zona corrente e pontes térmicas, e a solução composta, apresentando apenas uma diferença de 3%. Isto indica que a solução composta poderá ser uma substituição viável à outra solução, não provocando grandes diferenças a nível energético.

#### 7.3.4 Necessidades energéticas de arrefecimento – soluções de melhoria com 6cm de espessura

Na figura 7.13 apresentam-se os resultados referentes aos resultados obtidos para as necessidades energéticas de arrefecimento, para as melhorias com 6 cm de espessura.

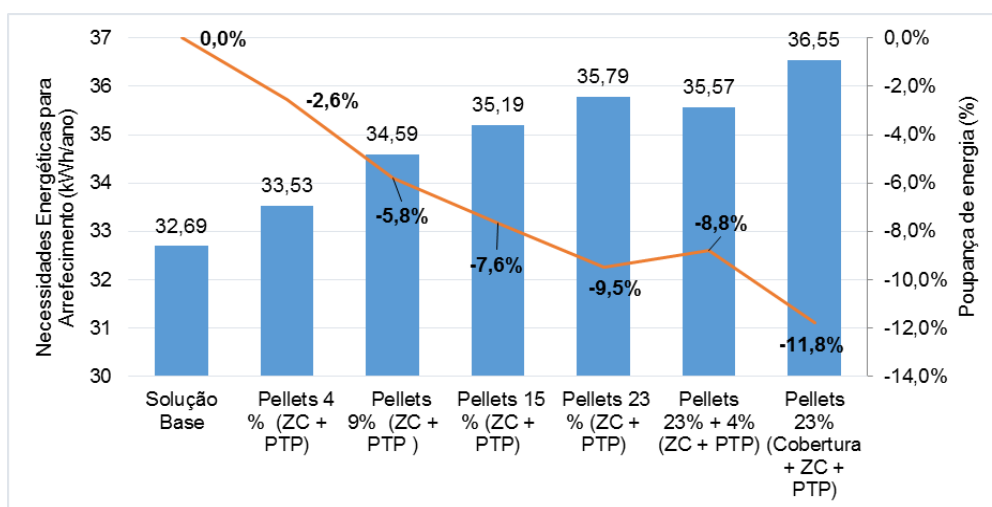


Figura 7.13 - Necessidades energéticas de arrefecimento - Espessuras a 6 cm

Tal como para as soluções de melhoria com espessuras de 4 cm, para estas soluções verifica-se um aumento crescente nas necessidades de arrefecimento. Apesar de este aumento ser mais acentuado (atingindo um máximo de 12 %), este não se sobrepõe às necessidades de aquecimento obtidas, sendo bastante inferior.

Estes acréscimos devem-se essencialmente à diminuição das perdas térmicas, provocando uma maior necessidade energética para arrefecer o edifício durante o Verão. A sua influência será maior quanto mais eficiente for a solução de melhoria adotada, e portanto, os acréscimos serão mais acentuados para as soluções de com 8 cm de espessura.

### 7.3.5 Necessidades energéticas de aquecimento – soluções de melhoria com 8 cm de espessura

Na figura 7.14 apresentam-se os resultados obtidos para as soluções com 8 cm de espessura.

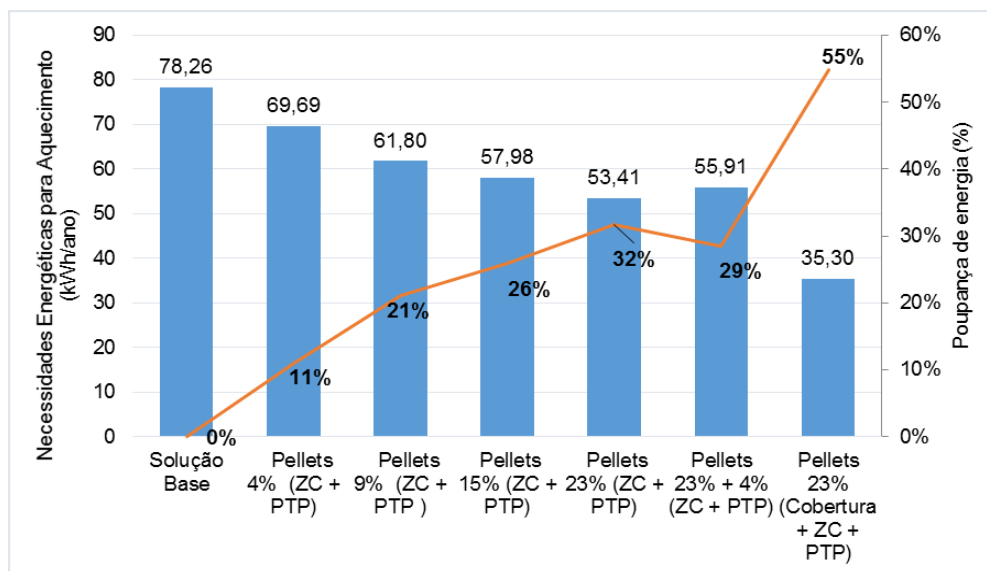


Figura 7.14 - Necessidades energéticas de aquecimento - Espessuras a 8 cm

Este grupo de melhorias são os que apresentam os melhores resultados em termos de necessidades de aquecimento, apresentando valores bastante significativos em termos de poupança de energia. Tal como para as soluções anteriormente referidas, a solução de melhoria com a aplicação de pellets na cobertura e nas paredes exteriores, apresenta valores muito superiores de poupança de energia do que as outras soluções, atingindo o valor de 55 %.

A segunda melhoria mais eficiente apresenta (aplicação de argamassa P<sub>23</sub> nas paredes exteriores) uma poupança de 32 %, constituindo uma diferença de 23 % para a melhoria mais efetiva, o que mostra a larga diferença entre as duas.

Comparando os resultados obtidos com as soluções com 6 cm de espessura, as diferenças também se mostram consideráveis. De um modo geral ocorre um aumento de 4 % de poupança adicionando mais 2 cm de reboco, o que constitui resultados satisfatórios.

### 7.3.6 Necessidades energéticas de arrefecimento – soluções de melhoria com 8 cm de espessura

Na figura 7.15 apresentam-se as necessidades energéticas de arrefecimento para as melhorias com espessura de 8 cm. Tal como esperado, os valores nas necessidades de arrefecimento são mais elevados para as soluções de melhoria com 8 cm de espessura.

Estes resultados mostram que este tipo de melhorias com recurso a pellets de madeira são muito efectivas a nível de reduções das necessidades de aquecimento, mas no entanto provocam um aumento nas necessidades de arrefecimento. Na verdade este fenómeno constitui uma situação

comum para soluções construtivas com uma espessura de isolamento térmico significativa, aplicadas ao clima Português.

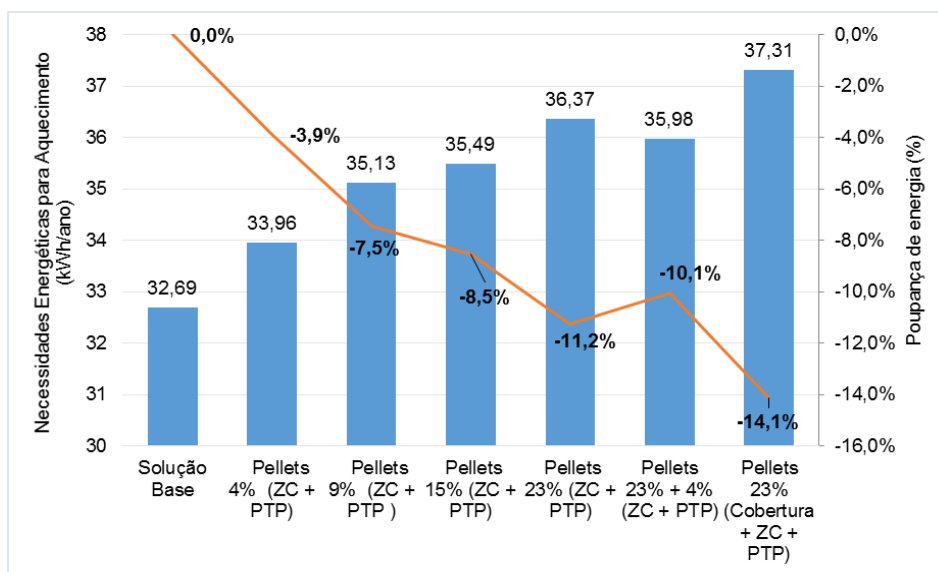


Figura 7.15 - Necessidades energéticas de arrefecimento - Espessuras a 8 cm

Na realidade, o aumento do isolamento térmico só irá provocar uma redução nas perdas térmicas, o que irá provocar uma consequente diminuição nas necessidades energéticas de aquecimento. No Verão, a situação é diferente, as grandes temperaturas a que o interior dos edifícios está sujeito, provêm da grande quantidade de ganhos térmicos provocados pela radiação solar, sendo que o aumento da espessura de isolamento térmico não melhora estas condições, muito pelo contrário, piora ligeiramente. De modo a minimizar as necessidades de arrefecimento devem ser adotadas outras estratégias passivas, sendo uma das mais comuns, o sombreamento. Isto pode ser garantido através da inclusão de palas horizontais nos vãos, plantação de árvores de folha caduca nas imediações do edifício, entre outras. Estas soluções provocam o sombreamento na fachada do edifício, diminuindo assim a radiação solar incidente, o que provoca uma redução nos ganhos energéticos e das necessidades de arrefecimento. No entanto esta problemática não está no âmbito deste trabalho, visto que as necessidades de arrefecimento não se consideram gravosas.

## 7.4 Condensações internas e superficiais

Uma análise relativa às condensações superficiais e internas também foi realizada, especificamente na zona corrente das paredes exteriores e nas pontes térmicas planas. As condições estabelecidas estão representadas no quadro 7.10, constituindo condições extremas que foram retiradas do ficheiro climático disponibilizado pelo *Energy Plus* correspondendo a um dia bastante rigoroso do mês de Janeiro.

Quadro 7.10 - Condições de humidade e temperatura assumidas

Ti (°C)	HRi (%)	Te (°C)	HRe (%)
18	75	5	95

### 7.4.1 Condensações Superficiais

Relativamente às condensações superficiais, tal como enunciado na secção 3.4.1, para cada solução foi calculada a temperatura de ponto de orvalho e a temperatura superficial interior de cada elemento. Se a temperatura de orvalho for superior à temperatura superficial do elemento, ocorre condensação superficial no mesmo.

Os valores podem ser diferentes para cada zona da parede exterior, na zona corrente ou na ponte térmica plana, visto a temperatura superficial depender do U do respetivo elemento.

No quadro 7.11 mostra-se um exemplo dos resultados obtidos em relação às condensações superficiais para a solução base.

No caso apresentado, conforme é observável, ocorrem condensações superficiais na ponte térmica plana, visto a temperatura de orvalho ser superior à temperatura superficial. No entanto o mesmo já não acontece para zona corrente, devido à resistência térmica desta zona ( $R_t = 0,81 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ ) ser mais elevada do que a da ponte térmica ( $R_t = 0,35 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ ).

Quadro 7.11 - Condensações Superficiais - Solução Base

Solução Base		
Elemento	PTP	ZC
U ( $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ )	2,9	1,2
T <sub>si</sub> ( $^\circ\text{C}$ )	13,13	15,91
$\theta$ ( $^\circ\text{C}$ )	13,50	13,5

Ora tendo que conta que todas as soluções possuem um valor de U menos elevado do que a solução base, não irão ocorrer condensações nas zonas correntes das outras soluções de melhoria. Em relação às pontes térmicas, existe possibilidade de ocorrerem condensações superficiais, no entanto esta será muito reduzida, devido à proximidade do valor da temperatura superficial ao valor da temperatura de orvalho, que tem tendência a aumentar.

Os resultados obtidos suportam estas afirmações, não tendo ocorrido condensações internas em nenhuma das soluções de melhoria analisadas.

### 7.4.2 Condensações internas

As condensações internas foram calculadas através do método de Glaser, tal como enunciado na secção 3.4.2.

O método utilizado, consiste no cálculo dos valores das pressões parciais de vapor de água nos elementos e das respetivas pressões de saturação. Caso a pressão de vapor de água iguale a pressão de saturação, a humidade relativa é de 100 % e, ocorrem condensações internas.

Nas figuras 7.16 e 7.17 estão representados os gráficos que representam a variação das pressões interiores com as pressões de saturação, para a zona corrente e para as pontes térmicas planas, respetivamente para as soluções de melhoria com espessura de 4cm.

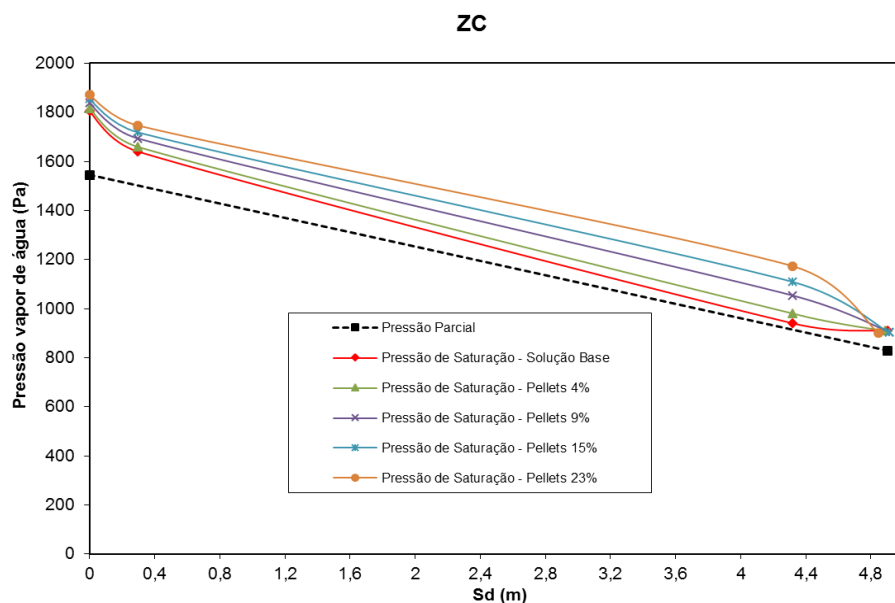


Figura 7.16 - Condensações Internas - ZC: Espessura 4 cm

Conforme é possível observar nos gráficos apresentados, não ocorre nenhuma condensação interna na zona corrente, nas soluções de melhoria com espessura de 4 cm. No entanto, na zona de ponte térmica plana, irão ocorrer condensações na solução base e na solução de melhoria utilizando pellets a 4%.

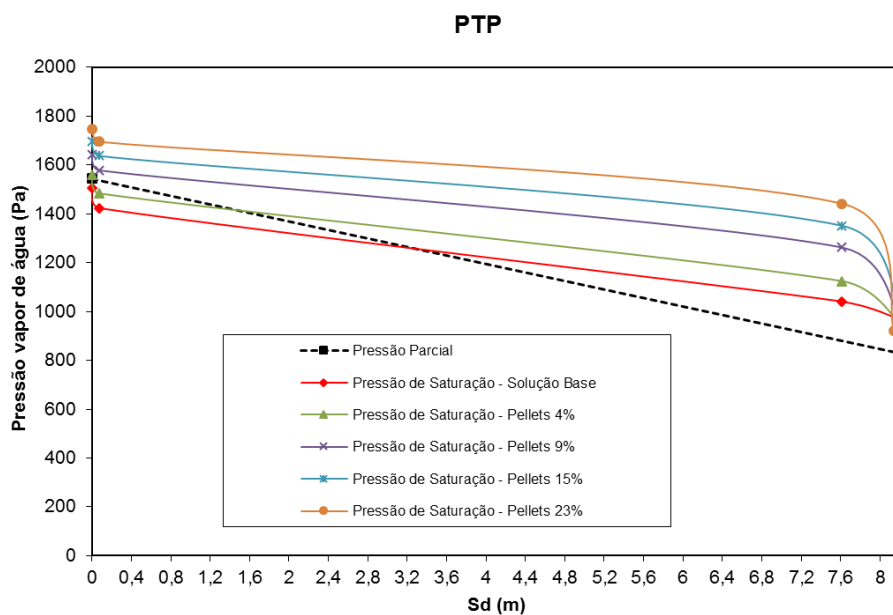


Figura 7.17 - Condensações Internas - PTP: Espessura 4 cm

Na figura 7.18 apresentam-se a variação das pressões, na zona corrente para as soluções de melhoria com 6 cm de espessura. Observa-se facilmente que não existirão condensações internas (visto não haverem intersecções das retas de pressão de saturação com a reta de pressão parcial de vapor de água), havendo tendência das linhas de pressão de saturação se “afastarem” da reta de pressão parcial.

Na figura 7.19 apresenta-se a variação de pressões nas pontes térmicas planas para as mesmas soluções de melhoria. Analisando este gráfico verifica-se que acontecem condensações internas para a solução com pellets a 4 %, sendo que as retas que representam as pressões de saturação das outras soluções se encontram bastante afastadas da reta de pressão parcial.

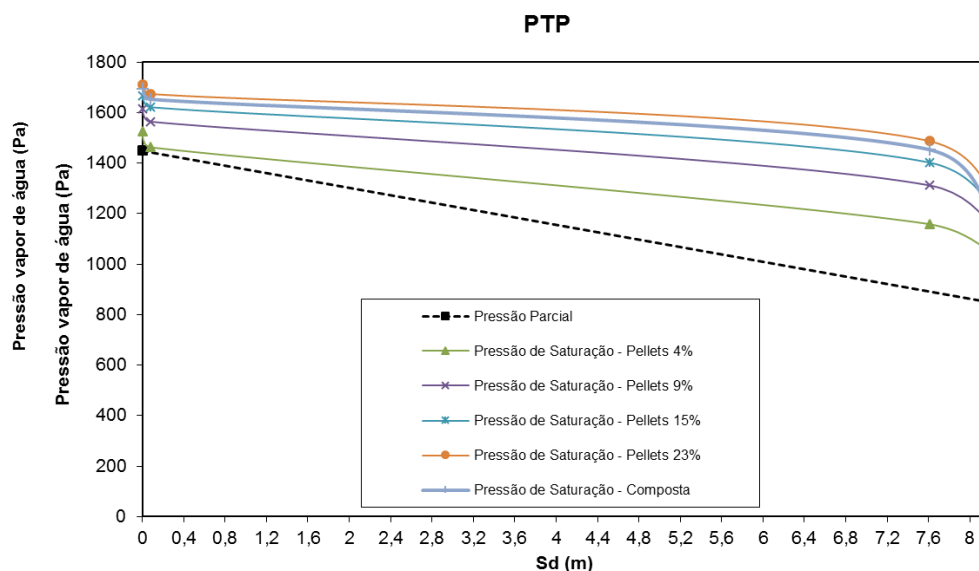


Figura 7.19 - Condensações Internas - PTP: Espessura 6 cm

Por último, nas figuras 7.20 e 7.21 são apresentadas a variações das pressões para a zona corrente e pontes térmicas planas para as melhorias com 8 cm. Nestas verifica-se que não ocorrem quaisquer condensações internas.

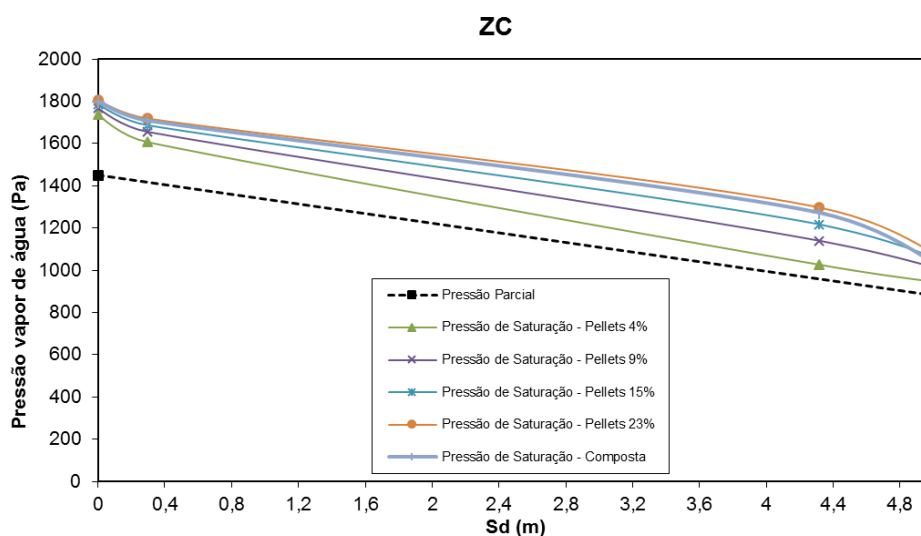


Figura 7.20 - Condensações Internas - ZC: Espessura 8 cm



Os resultados demonstram a eficiência da utilização de soluções com pellets de madeira na resolução da problemática das condensações internas, visto que de todas as soluções realizadas estas apenas ocorreram em duas soluções de melhoria (com pellets a 4 %). Observando os gráficos no geral também se verifica que quanto maior a dosagem de pellets utilizado maior é o afastamento entre as curvas de saturação e as de pressão parcial de vapor de água, o que indica uma maior temperatura no interior dos elementos e assim menor probabilidade de ocorrência de condensações internas.

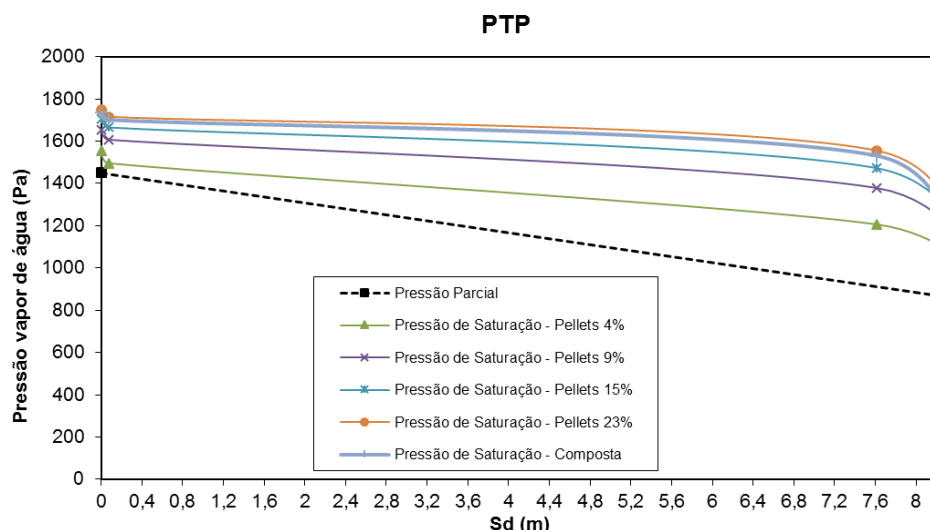


Figura 7.21 - Condensações Internas - PTP: Espessura 8 cm

## 7.5 Análise económica

### 7.5.1 Introdução

Após a produção das argamassas com recursos a pellets de madeira e da avaliação do seu desempenho térmico, é necessário proceder a uma avaliação económica de modo a perceber se a sua produção é economicamente viável e, de que modo a sua aplicação pode trazer retorno financeiro.

Para isso realizou-se um estudo económico, com base no realizado por Leal (Leal 2012), onde são calculados os custos de exploração e posteriormente os custos globais, para cada solução de melhoria adotada.

Os custos foram calculados para um período de 50 anos.

### 7.5.2 Custo de exploração

O custo de exploração diz respeito ao custo de energia do edifício que tem associado a solução de melhoria. O custo de exploração,  $C_{exp}$ , foi calculado, utilizando a seguinte fórmula:

$$C_{exp\ n} = \frac{\left(\frac{Ni}{\eta_i} + \frac{Nv}{\eta_v}\right) \times A_{pavimento} \times Ce \times (1 + \alpha')^n}{A_{fachada}} \quad (22)$$

em que:

$C_{exp\ n}$  – custo de exploração para o ano  $n$  (€/m<sup>2</sup> de fachada);

$Ni$  – necessidades energéticas de aquecimento (kWh/m<sup>2</sup>.ano);

$Nv$  – necessidades energéticas de arrefecimento (kWh/m<sup>2</sup>.ano);

$\eta_{i,v}$  – fator de utilização dos ganhos térmicos na estação correspondente;

$A_{\text{pavimento}}$  – área do pavimento ( $\text{m}^2$ );

$C_e$  – custo de energia (€);

$\alpha'$  - crescimento anual da energia elétrica;

$n$  – número de anos após a aplicação;

$A_{\text{fachada}}$  – área de fachada ( $\text{m}^2$ ).

Nestes cálculos utilizou-se um valor de 0,17 € para o valor do kWh e um valor de 0,035 para o crescimento anual da energia.

Com os valores obtidos, foram traçados gráficos de variação do custo de exploração ao longo dos anos. Nas figuras 7.22, 7.23 e 7.24 estão representados estes gráficos para as soluções de melhoria, com 4, 6 e 8 cm de espessura, respetivamente.

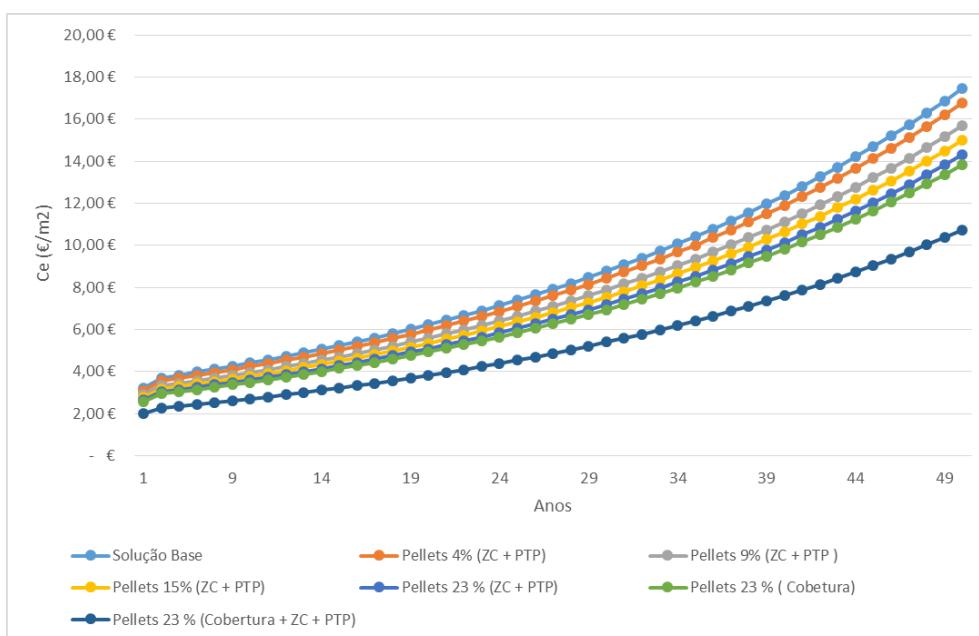


Figura 7.22 - Custo de exploração - Espessura 4 cm

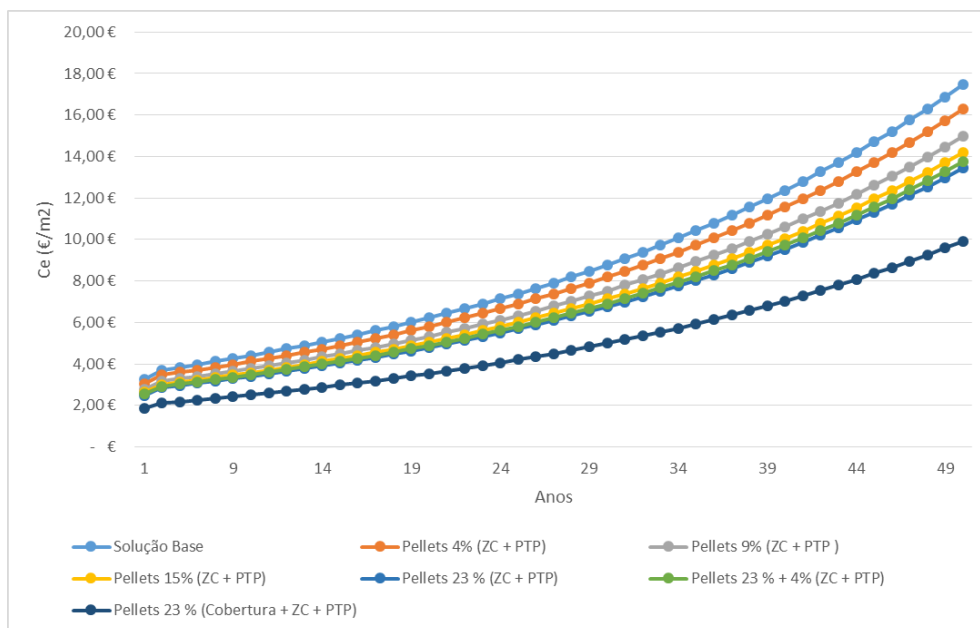


Figura 7.23 - Custo de exploração - Espessura 6 cm

Observando os três gráficos, denota-se que a solução com um maior custo de exploração será sempre a solução base, situando-se a sua curva acima de todas as outras, sendo seguida da solução com percentagem de pellets mais reduzida. A curva que situa mais abaixo em todos os gráficos é a da solução de pellets a 23% aplicados na cobertura, zona corrente e ponte térmica. Isto demonstra que apesar de esta curva possuir valores mais elevados de necessidades de arrefecimento, esta solução ainda assim apresenta os valores mais baixos de necessidades energéticas globais, que se traduz em custos de exploração mais reduzidos.

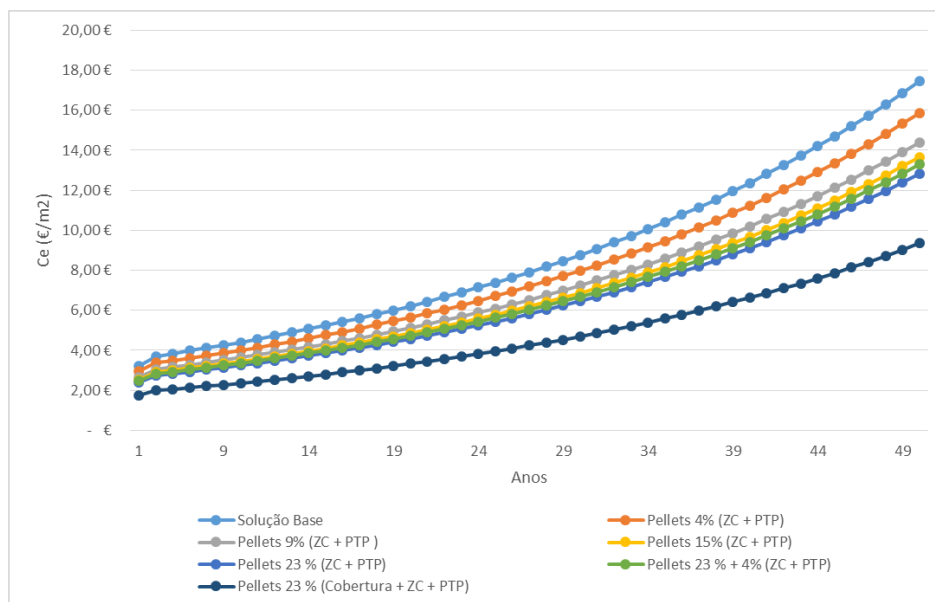


Figura 7.24 - Custo de exploração - Espessura 8 cm

### 7.5.3 Custos globais

Os custos globais são referentes os custos que englobam os custos de investimento da aplicação da solução adotada, os custos de manutenção associados e os custos de exploração. Estes custos são então dados pela fórmula seguinte:

$$C_g = C_0 + C_{man} + C_{exp} \quad (23)$$

em que:

$C_g$  – custo global (€/m<sup>2</sup> de fachada);

$C_0$  – custo inicial (€/m<sup>2</sup> de fachada);

$C_{man}$  – custo de manutenção (€/m<sup>2</sup> de fachada);

$C_{exp}$  – custo de exploração (€/m<sup>2</sup> de fachada).

O custo inicial diz respeito ao custo de aplicação da solução construtiva nos elementos respetivos tendo em conta os custos dos materiais, mão-de-obra e equipamentos.

O custo de manutenção diz respeito à manutenção periódica a que a solução construtiva é sujeita. É necessário ter em conta que este custo sofre alterações ao longo do tempo tendo em conta taxas de inflação para prever as variações de preços. A fórmula utilizada para o cálculo de custos, é dada da seguinte forma:

$$C_{man,n} = C_{man,0} \times (1 + \alpha)^n \quad (24)$$

em que:

$C_{man,n}$  – custo de manutenção no ano em análise (€/m<sup>2</sup> de fachada);

$C_{man,0}$  - custo de manutenção no ano 0 (€/m<sup>2</sup> de fachada);

$\alpha$  - taxa de inflação;

$n$  – número de anos após aplicação.

Nas figuras 7.25, 7.26 e 7.27, são apresentados os custos globais das soluções estudadas, com 4, 6 e 8 cm de espessura, respetivamente.

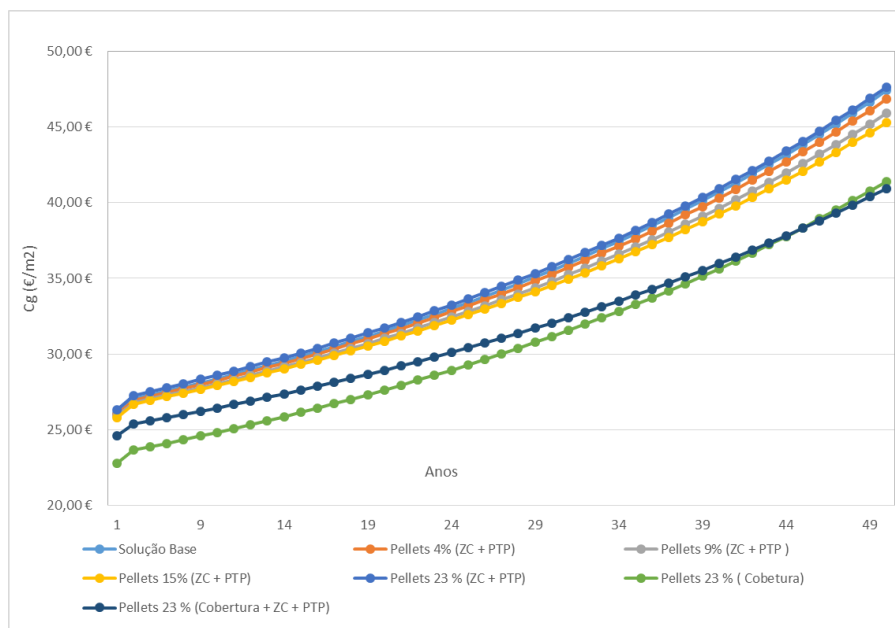


Figura 7.25 - Custos Globais - Espessura 4 cm

Verifica-se que para a espessura de 4cm, as soluções que apresentam valores mais baixos a longo prazo são a “Pellets 23% (Cobertura)” e “Pellets 23 % (Cobertura + ZC + PTP)”. Nos primeiros anos, a segunda solução tem um custo global mais elevado, mas a longo prazo o seu custo acaba por ser mais reduzido, que o da solução onde é intervencionada apenas a cobertura. No entanto estas duas soluções possuem valores ao ano 50 muito semelhantes com 40,93 €/m<sup>2</sup> e 41,41 €/m<sup>2</sup>, cerca de 6 a 7 €/m<sup>2</sup> inferior ao valor do cenário inicial.

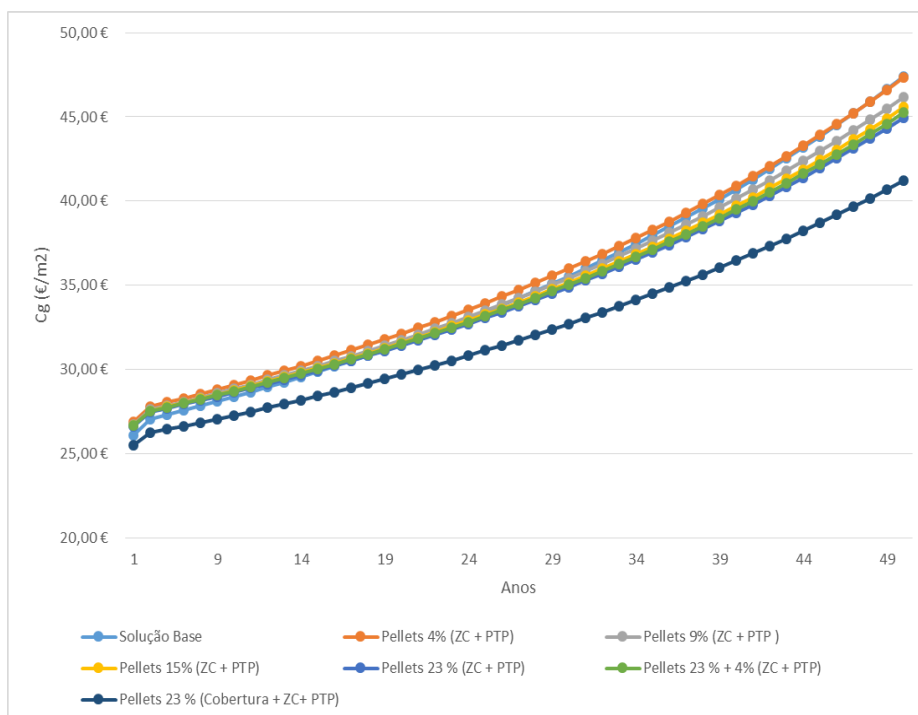


Figura 7.26 - Custos Globais - Espessura 6 cm

Para as restantes soluções, espessuras de 6 cm e 8 cm, a solução de melhoria que apresenta valores mais baixos ao final dos 50 anos, é “Pellets 23 % (Cobertura + ZC + PTP)”. Para as duas espessuras esta solução destaca-se das restantes, apresentando nos dois casos, valores finais muito semelhantes. Para a espessura de 6cm a solução termina o período com um custo de 41,22 €/m<sup>2</sup>, cerca de 6,18 €/m<sup>2</sup> mais barato que a solução base; e para a espessura de 8 cm a solução apresenta um valor de 41,72 €/m<sup>2</sup>, cerca de 5,68 € de poupança em relação ao cenário inicial.

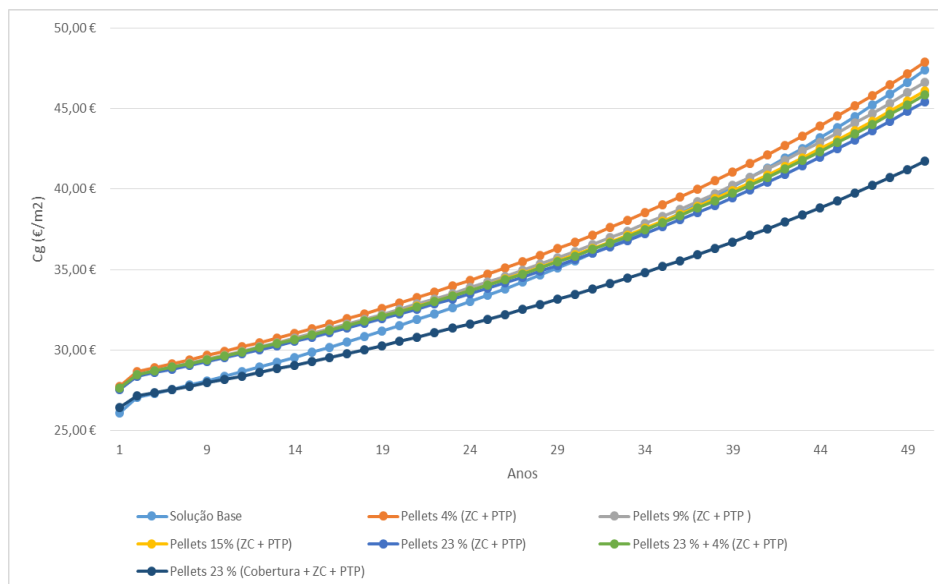


Figura 7.27 - Custos Globais - Espessura 8 cm

Com base nestes resultados foi selecionada a solução “Pellets 23 % (Cobertura + ZC + PTP)” com espessura de 8 cm e esta foi analisada, averiguando em quanto tempo se obteria o retorno do investimento inicial realizado.

Estes dados podem ser observados na figura 7.28.

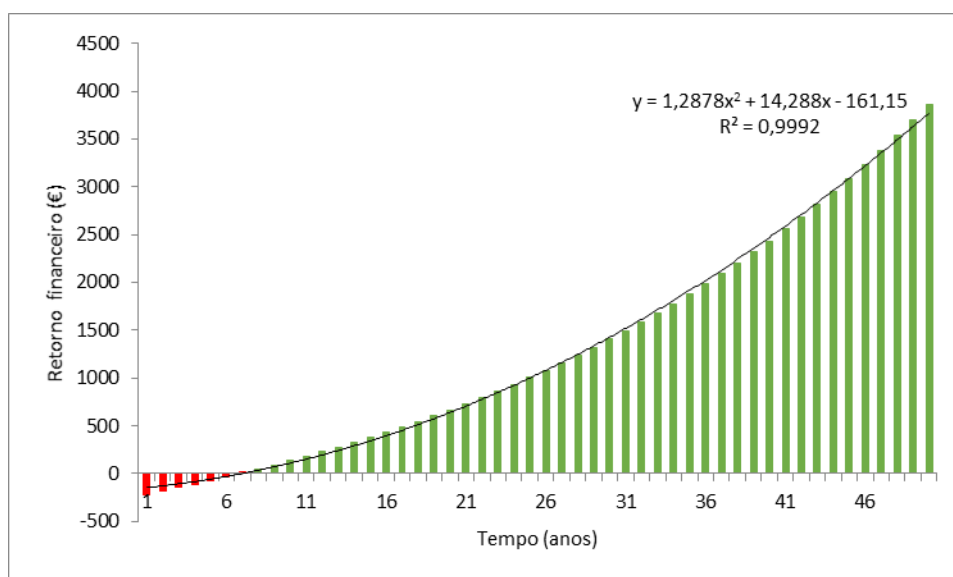


Figura 7.28 - Retorno financeiro

Analisando os dados obtidos, verifica-se que aplicando a solução selecionada é possível obter um retorno a partir do 6 ano de investimento, sendo que o retorno financeiro ao fim de 50 anos é de cerca de 4000 €.

## 8 Discussão e Conclusões

Neste capítulo será realizada uma discussão crítica tendo em conta os resultados obtidos nos capítulos 6 e 7. De modo a facilitar a compreensão acerca destas considerações, estas serão divididas em duas partes, sendo primeiro abordadas as conclusões relativas à campanha experimental, posteriormente as conclusões relativas à análise numérica e por último uma apreciação final.

### 8.1 Conclusões

#### 8.1.1 Campanha Experimental

Relativamente à campanha experimental foi possível obter alguns resultados interessantes acerca do comportamento físico das argamassas com pellets de madeira.

Conforme os resultados anteriores demonstram, as argamassas com incorporação de pellets apresentaram decréscimos significativos tanto maiores quanto maior o teor de pellets incorporado. Estes resultados também foram “melhores” (no sentido de uma maior redução) do que os obtidos por Martinho (2017), que estudou também a incorporação de várias percentagens de pellets de madeira em argamassas à base de cimento. Ora estes resultados revelam que a inclusão de pellets de madeira na constituição das argamassas se revela num decréscimo considerável na condutibilidade térmica mais efetiva e mais acentuada quando aplicada em argamassas à base de cal hidráulica.

Em relação ao comportamento face à água, este foi avaliado através do ensaio de absorção de água por capilaridade, e pelo ensaio de secagem, cujos resultados são apresentados na secção 6.4.3 e 6.4.4, respetivamente. Os coeficientes de capilaridade obtidos para as argamassas não registaram uma tendência específica, com valores mais reduzidos para as misturas com menor quantidade de pellets ( $P_4$  e  $P_9$ ) e um aumento acentuado para as misturas com maior quantidade de pellets ( $P_{15}$  e  $P_{23}$ ). Esta discrepância nos resultados é devida à influência da higroscopicidade e da porosidade das argamassas, influência esta que varia a partir de um determinado teor de pellets de madeira. Pelos resultados obtidos é possível concluir que haverá um aumento do coeficiente de capilaridade a partir de uma certa percentagem de pellets (estima-se um valor próximo aos 10%), o que se traduz numa maior rapidez na absorção de água. Em relação ao valor assintótico, o aumento da percentagem de pellets de madeira, provoca um aumento neste valor. Avaliando estas duas grandezas, assume-se que com o aumento do teor em pellets, as argamassas terão maior tendência em absorver a água em quantidades maiores.

Os resultados referentes ao ensaio de secagem mostraram uma tendência de aumento da taxa de secagem das argamassas com pellets em relação à argamassa de referência, o que indica que as argamassas com pellets terão uma velocidade de secagem maior. Em relação ao índice de secagem este só apresentou uma variação (ainda que não muito grande) para a mistura com maior teor de pellets, o que pode indicar que para grandes percentagens de pellets, as argamassas terão uma maior facilidade na sua secagem.

Em relação à porosidade aberta, os resultados obtidos eram os esperados, o aumento de pellets provoca um aumento com a porosidade aberta. Esta tendência também está relacionada com o aumento de água utilizado na amassadura das argamassas (que foi tanto maior quanto maior a percentagem de água), na medida em que esta água vai evaporar no processo de cura, provocando assim uma maior quantidade de poros na argamassa.

Em suma os resultados obtidos destacam-se positivamente, sobretudo pelos valores reduzidos de condutibilidade térmica, o que, se utilizados em rebocos, irá permitir diminuir consideravelmente as trocas energéticas. Falando ainda em resultados positivos, destaca-se também o índice e a taxa de secagem, obtendo assim argamassas que secam com maior facilidade e rapidez. Também existe um decréscimo da massa volúmica das argamassas com o aumento de pellets, podendo ser considerado

um efeito positivo, na medida em que há uma redução do peso próprio da argamassa, permitindo assim obter soluções construtivas mais “leves”.

Por outro lado, as argamassas apresentam aspetos negativos, sobretudo em relação aos resultados provenientes do ensaio de absorção de água por capilaridade, visto que estas absorvem grandes quantidades de água, muito rapidamente, o que não é de todo, o desejado. A porosidade aberta não tem uma influência definida tendo em conta que por um lado, esta provoca um aumento na capilaridade, mas também um aumento na secagem.

### **8.1.2 Análise numérica**

A análise numérica realizada teve ênfase em relação às perdas térmicas e necessidades energéticas (de aquecimento e arrefecimento). Foi avaliada a problemática das condensações, superficiais e internas, e foi realizada uma análise financeira.

Em relação às perdas térmicas constatou-se que os elementos mais condicionantes tratam-se da cobertura e da zona corrente (devido às suas grandes dimensões), sendo que optou-se por serem adotadas intervenções que complementassem também a cobertura. Ao analisarem-se os resultados obtidos, verifica-se que a utilização de rebocos com um crescente aumento do teor em pellets, traz reduções ao nível das perdas térmicas, que decrescem ainda mais quando aplicados em maiores espessuras de parede.

Dentro das soluções analisadas destacam-se as soluções com maior teor de pellets apenas nas paredes exteriores, em várias espessuras, e as soluções com aplicação da argamassa com maior quantidade de pellets nas paredes exteriores conjugadas com a cobertura, em várias espessuras.

No geral, todas as soluções provocam reduções significativas nas perdas térmicas, que são maiores, para a mesma espessura, quanto maior teor de pellets de madeira utilizados, que advém da menor condutibilidade térmica da mistura.

Os resultados relativos às necessidades energéticas de aquecimento apresentaram excelentes resultados, possibilitando reduções substanciais, até aos 55 % (em relação à solução base). No entanto, as necessidades de arrefecimento apresentam uma ligeira subida. Esta subida, no geral é maior quanto maior a espessura de argamassa aplicada, e para, a mesma espessura, quanto maior for o teor em pellets de madeira da mistura. Isto deve-se pelo facto de se estar a “isolar” a envolvente, que diminui as perdas térmicas, fazendo com que haja menos perdas de calor no Inverno, e assim tornando o interior mais quente, mas no Verão o arrefecimento torna-se mais difícil, necessitando de mais energia para alcançar a temperatura de conforto. No entanto os aumentos na estação de arrefecimento não são considerados significativos, face às grandes reduções atingidas na estação de aquecimento, e por isso considera-se que a argamassa apresenta um bom desempenho energético.

Sobre a problemática das condensações, nomeadamente no caso das condensações superficiais, verificou-se que as soluções adotadas permitem diminuir a ocorrência deste fenómeno, o que constitui uma mais-valia, visto que estas constituem uma grande problemática dos edifícios, em geral. No caso das condensações internas, os resultados foram no geral, bastante positivos, apenas tendo sido verificadas em soluções com valores mais baixos de condutibilidade térmica.

Por fim a análise financeira demonstrou, que apesar do investimento inicial ser elevado, este tipo de soluções permite um retorno num período inferior a 50 anos. Mais especificamente a solução com melhores resultados (solução com pellets a 23 % aplicado na zona corrente, pontes térmicas e cobertura) permite um retorno do investimento ao fim de 6 anos, e ao fim de 50 gera um “lucro” de 4000 euros.



### 8.1.3 Apreciação Geral

Fazendo uma apreciação geral em relação ao estudo realizado, tendo em conta o objetivo deste trabalho, conclui-se que os resultados foram positivos, no entanto com algumas limitações. Os resultados em termos energéticos foram bastantes positivos, as soluções provocam reduções nas necessidades energéticas, sendo que as soluções com teores mais elevados de pellets de madeira, provocam reduções consideráveis. O objetivo desta dissertação era estudar o desempenho energético destas soluções, e face aos resultados obtidos, é seguro dizer que os objetivos foram atingidos, com sucesso.

No entanto, a análise realizada, foi uma análise teórica, no sentido em que esta assume que é possível aplicar estas argamassas nas fachadas de edifício, e não contabiliza, se é possível realmente realizar esta aplicação. Os resultados obtidos na análise experimental (realizada com o objetivo, de apenas obter as características da argamassa, para efeitos de modelação numérica) não permite perceber se de facto a aplicação de uma argamassa deste tipo para revestimentos exteriores é possível, sendo necessário a realização de um estudo mais intensivo, para avaliar outras propriedades físicas e também mecânicas.

Caso se verifique possível a utilização destas argamassas em rebocos poderá trazer algumas vantagens. A sua aplicação poderá ser semelhante à estudada (aplicada como reboco conjuntamente com uma solução de parede simples) ou associada a outro tipo de soluções, como por exemplo para o caso das paredes duplas, permitindo uma redução do isolamento térmico no interior da parede, o que poderá trazer reduções a nível económico. A correção das pontes térmicas também fica facilitada através deste tipo de soluções, permitindo a aplicação de um revestimento contínuo pelo exterior.

## 8.2 Desenvolvimentos futuros

O estudo de argamassas com a introdução de pellets de madeira, é algo muito recente, havendo ainda bastantes estudos que devem ser realizados para melhorar e aferir o comportamento destas argamassas. De seguida serão enunciados alguns estudos, que se consideram necessários de modo a caracterizar as argamassas com pellets de madeira:

- Avaliação do comportamento mecânico de argamassas de cal hidráulica com pellets de madeira;
- Realização de ensaios de absorção de água por capilaridade com uma gama mais alargada de pellets de madeira;
- Realização de ensaios de permeabilidade ao vapor de água;
- Estudar a retração em argamassas com pellets incorporados;
- Realização de estudos com diferentes granulometrias de pellets, de modo a otimizar-se a mistura;
- Realização de estudos de envelhecimento acelerado;
- Realização de ensaios de desgaste à abrasão;
- Aplicação das argamassas em muretes para simular condições reais de serviço;
- Avaliar a viabilidade desta argamassas como constituintes da camada de forma para coberturas;
- Avaliação técnica e económica de novas soluções com argamassas de pellets de madeira tendo em conta o seu desempenho energético;
- Avaliação do comportamento acústico das argamassas;

- Avaliação da contribuição destas argamassas no controlo higratérmico do ambiente interior.

## 9 Bibliografia

- Alvarez, J., Sequeira, C., and Costa, M. (2005). Ensinaamentos a Retirar Do Passado Histórico Das Argamassas. in *1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção*.
- Augusto, C. O., Brangança, L., and Almeida, M. (2015). Materiais de Isolamento Térmico de Edifícios. Para Além Da Energia Operacional. Pp. 561–70 in *EURO ELECS*.
- Barros, C. (2013). Produção de Pellets Para Valorização de Resíduos Provenientes Da Indústria Corticeira. Escola de Engenharia-Universidade do Minho
- Bederina, M., Marmoret, L., Mezreb, K., and Bali, A. (2007). Effect of the Addition of Wood Shavings on Thermal Conductivity of Sand Concretes : Experimental Study and Modelling. *Construction and Building Materials* 21(March 2007):662–68.
- Brás, A., Gonçalves, F., and Faustino, P. (2014). Cork-Based Mortars for Thermal Bridges Correction in a Dwelling: Thermal Performance and Cost Evaluation. *Energy and Buildings* 72:296–308.
- Brás, A., and Henriques, F. (2009). The Influence of the Mixing Procedures on the Optimization of Fresh Grout Properties. *Materials and Structures* 42:1423–32.
- Brás, A., Leal, M., and Faria, P. (2012). Argamassas Com Comportamento Térmico Melhorado Com Materiais Sustentáveis. Pp. 1–5 in *2ª Conferência Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios no Espaço Lusófono*.
- Brás, A., Leal, M., and Faria, P. (2013). Cement-Cork Mortars for Thermal Bridges Correction. Comparison with Cement-EPS Mortars Performance. *Construction and Building Materials* 49:315–27.
- CEN. (1999). EN 1015-3:1999, *Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. CEN, Brussels.
- CEN. (2002). EN 1015-18:2002, *Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water-absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*. CEN, Brussels.
- CEN. (2013). EN 16233:2013, *Conservation of Cultural Heritage - Test methods - Determination of drying properties*. CEN, Brussels.
- Claudiu, A. (2014). Use of Sawdust in the Composition of Plaster Mortars. *ProEnvironment* 7:30–34.
- Corinaldesi, V., Mazzoli, A., and Siddique, R. (2016). Characterization of Lightweight Mortars Containing Wood Processing by-Products Waste. *Construction and Building Materials* 123(July):281–89.
- Costa, L. (2008). O Uso de Argamassas Tradicionais E Pré-Doseadas Para Impermeabilização Em Revestimentos Exteriores. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.
- Coutinho, J. (2002). *Ciências de Materiais - 1º Parte: Agregados Para Argamassas E Betões*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Cunha, S., Alves, V., Aguiar, J., and Ferreira, V. (2012). Argamassas Térmicas Sustentáveis : O Contributo Dos Materiais de Mudança de Fase. in *4º Congresso Português de Argamassas e ETICS*.
- Duarte, J. (2010). Condensações Superficiais Interiores - Avaliação Do Risco. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Eiras, J. N. , Segovia, F., Borrachero, M. V., Monzó, J., Bonilla, M., Payá, J. (2014). Physical and Mechanical Properties of Foamed Portland Cement Composite Containing Crumb Rubber from Worn Tires. *Materials and Design* 59(March):550–57. <http://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.021>.
- Faria, P. (2004). Argamassas de Revestimento Para Alvenarias Antigas - Contribuição para o estudo da influência dos ligantes. Dissertação de Douturamento em Engenharia Civil - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte de Caparica.

- Faria, P. (2010). Argamassas Sustentáveis. Pp. 1–12 in *2ª Conferência Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios no Espaço Lusófono*.
- Faria, P., Costa, J., Lourenço, T., Figueiredo, T., and Silva, V. (2014). Caracterização de Rebocos de Argamassas de Cal Aérea E de Cal Hidráulica Natural Com Metacaulino E Resíduos Cerâmicos Em Exposição Natural. in *Argamassas 2014 - Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento*.
- Fernandes, N. (2011). Análise energética do corpo central do edifício do DEMI-UNL através do software energyPlus. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte de Caparica.
- Fontes, T. (2013). Argamassas de Cal Hidráulica Natural NHL3.5 de Fabrico Nacional - Otimização de características com resíduo cerâmico e metacaulino. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte de Caparica.
- Fontes, T., Faria, P., and Silva, V. (2012). Caracterização de Argamassas de Cal Hidráulica Natural Com Metacaulino E Resíduo Cerâmico. in *Congresso Construção 2012*.
- Gadea, J., Rodríguez, A., Campos, P. L., Garabito, J., and Calderón, V. (2010.) Lightweight Mortar Made with Recycled Polyurethane Foam. *Cement and Concrete Composites* 32(9):672–77. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.017>.
- Gomes, A., Pinto, A., and Pinto, J. (2013). *Cimento Portland e Adições*. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Gonilho-Pereira, C., Martins, A., Faria, P., and Fangueiro, R. (2012). “Avaliação da Introdução da Indústria Têxtil em Argamassas.” in *4º Congresso Português de Argamassas e ETICS*.
- Henriques, F. (2007). *Comportamento Higrotérmico de Edifícios*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte de Caparica.
- IPQ. (2000). NP EN 993-1:2000, Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Método de peneiração. IPQ, Almada.
- IPQ. (2002). NP EN 1097-3:2000, Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios. IPQ, Almada.
- IPQ. (2008). NP EN 1936:2008, Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação das massas volúmicas real e aparente das porosidades total e aberta. IPQ, Almada.
- IPQ. (2012). NP EN 197-1:2012, Cimento - Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. IPQ, Almada.
- IPQ. (2015). NP EN 459-1:2015, Cal de construção - Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade. IPQ, Almada.
- IPQ. (2017). NP EN 196-1:2017, Métodos de ensaio de cimentos - Parte 1: Determinação das resistências mecânicas. IPQ, Almada.
- Leal, M. (2012) Desenvolvimento de argamassas de revestimento com comportamento térmico melhorado. Instituto Politécnico de Setúbal, Setúbal.
- LNEC. (2006). ITE 50 - Coeficientes de transmissão Térmica de Elementos Da Envolvente Dos Edifícios. LNEC, Lisboa.
- Lourenço, R., (2010). Desempenho de argamassas para reabilitação de revestimentos de fachadas desagregadas sob acções gelo/degelo. Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- Madeira, T. (2013). Argamassas de cal hidráulica natural NHL 3.5 com resíduos cerâmicos. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte de Caparica.
- Marques, A. (2015). Utilização energética da biomassa em Portugal - Caso de estudo da Tratolixo. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Martinho, P. (2017). Análise do comportamento de argamassas com a incorporação de wood pellets.

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte de Caparica.

- Martins, M. (2010). Comportamento Físico de Argamassas de Reboco Com Regranulado Negro de Cortiça. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Matias, G., Faria, P., and Torres, I. (2013). Viability of Ceramic Residues in Lime-Based Mortars. Pp. 1–8 in *3rd Historic Mortars Conference*.
- Matias, G., Torres, I., and Faria, P. (2014). “Argamassas de Reabilitação Com Resíduos de Cerâmica.” Pp. 1480–87 in *REHABEND*.
- Mckendry, P. (2017). Energy Production from Biomass (Part 1): Overview of Biomass. *Bioresource Technology* 83 (June): 37-46.
- Melo, H. (2014). Caracterização Experimental Do Comportamento Físico de Argamassas de Desempenho Térmico Melhorado. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Mesquita, J. (2010). Argamassas Tradicionais E Industriais de Alvenaria Em Edifícios. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Monteiro, J. M., Aguiar, J. B., Bragança, L. M., Gomes, J. R., and Santos, P. (2005). “Argamassas Com Desempenho Térmico Melhorado.” in *1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção*.
- Rodrigues, A. M., Piedade, A., and Braga, A. M. (2009). *Térmica de Edifícios*.
- Paz Branco, J. (1994). *Historial e Finalidades da Construção: A Auto Construção*.
- Pedro, D. (2011). Desempenho de Argamassas Fabricadas Com Incorporação de Materiais Finos Provenientes Da Trituração de Pneus. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Pereira, V. (2013). Avaliação Experimental de Argamassas Com Agregados Leves Impregnados Com Materiais de Mudança de Fase. Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- Piteira, R. (2015). Argamassas de Cal Hidráulica Natural Com Resíduos de Borracha Da Recauchutagem de Pneus. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte de Caparica.
- Rabaçal, M. (2010). Influência Das Características Do Combustível No Desempenho Energético E Ambiental de Caldeiras Domésticas. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Roussado, F. (2008). Avaliação Dos Impactes Construtivos E Ambientais Da Regulamentação Térmica. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Sá, A. (2009). Caracterização Da Recolha de Matéria-Prima Para a Produção de Pellets. Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Silva, A. (2014). Desempenho de Argamassas Com Incorporação de Agregados Finos de Resíduos Plásticos Seleccionados. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Silva, F., Batista, F., Silva, L., Martins, J., Rocha, P., Pina, R., and Santos, S. (2013). *Humidade Em Edifícios - Tipos de Intervenções Necessárias*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Silva, P. (2006). Análise Do Comportamento Térmico de Construções Não Convencionais Através de Simulação Em VisualDOE. Escola de Engenharia, Universidade do Minho.
- Silva, T. (2014). Comportamento Mecânico de Argamassas de Reboco Com Regranulado Negro de Cortiça Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Tittarelli, F., Giosuè, C., Mobili, A., Perna, C., and Monosi, S. (2016). Effect of Using Recycled Instead of Virgin EPS in Lightweight Mortars. *Procedia Engineering* 161:660–65.
- U.S. Department of Energy. (2016). Input Output Reference. in *EnergyPlus Version 8.7 Documentation*.
- Vale, H. (2014). Caracterização Experimental Do Comportamento Mecânico de Argamassas de Desempenho Térmico Melhorado. Instituto Superior Técnico, Lisboa.

- Veiga, M. (1998). Comportamento de Argamassas de Revestimento de Paredes - Contribuição Para O Estudo Da Sua Resistência À Fendilhação.
- Záleská, M., Pavlíková, M., and Pavlík, Z. (2016). Properties of Lightweight Cement-Based Composites Containing Waste Polypropylene. Pp. 1–5 in *A/P*, vol. 40030.

## Anexos

### A1. Soluções construtivas com pellets – 4, 6 e 8 cm

Quadro 9.2 – Soluções construtivas com 4 cm de espessura: zona corrente

Paredes Exteriores - Zona Corrente ( Pellets 4 %)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m <sup>2</sup> .°C/W)	Resistência Total (m <sup>2</sup> .°C/W)	U ( W/(m <sup>2</sup> .°C)
Estuque Interior	0,04	0,43	0,09	0,85	1,2
Tijolo Cerâmico	0,22	-	0,52		
Reboco Exterior - Pellets 4 %	0,04	0,56	0,07		
Total	0,3	-			
Paredes Exteriores - Zona Corrente ( Pellets 9 %)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m <sup>2</sup> .°C/W)	Resistência Total (m <sup>2</sup> .°C/W)	U ( W/(m <sup>2</sup> .°C)
Estuque Interior	0,04	0,43	0,09	0,94	1,1
Tijolo Cerâmico	0,22	-	0,52		
Reboco Exterior - Pellets 9 %	0,04	0,25	0,16		
Total	0,3	-			
Paredes Exteriores - Zona Corrente ( Pellets 15 %)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m <sup>2</sup> .°C/W)	Resistência Total (m <sup>2</sup> .°C/W)	U ( W/(m <sup>2</sup> .°C)
Estuque Interior	0,04	0,43	0,09	1,02	1,0
Tijolo Cerâmico	0,22	-	0,52		
Reboco Exterior - Pellets 15 %	0,04	0,17	0,24		
Total	0,3	-			
Paredes Exteriores - Zona Corrente ( Pellets 23 %)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m <sup>2</sup> .°C/W)	Resistência Total (m <sup>2</sup> .°C/W)	U ( W/(m <sup>2</sup> .°C)
Estuque Interior	0,04	0,43	0,09	1,12	0,9
Tijolo Cerâmico	0,22	-	0,52		
Reboco Exterior - Pellets 23 %	0,04	0,12	0,33		
Total	0,3	-			

Quadro 9.1 - Soluções construtivas com 4 cm de espessura: ponte térmica plana

Paredes Exteriores - Ponte Térmica Plana ( Pellets 4 %)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m <sup>2</sup> .°C/W)	Resistência Total (m <sup>2</sup> .°C/W)	U ( W/(m <sup>2</sup> .°C)
Estuque Interior	0,01	0,43	0,02	0,39	2,6
Betão Armado	0,25	2,00	0,13		
Reboco Exterior - Pellets 4 %	0,04	0,56	0,07		
Total	0,3	-			
Paredes Exteriores - Ponte Térmica Plana ( Pellets 9 %)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m <sup>2</sup> .°C/W)	Resistência Total (m <sup>2</sup> .°C/W)	U ( W/(m <sup>2</sup> .°C)
Estuque Interior	0,01	0,43	0,02	0,48	2,1
Betão Armado	0,25	2,00	0,13		
Reboco Exterior - Pellets 9 %	0,04	0,25	0,16		
Total	0,3	-			
Paredes Exteriores - Ponte Térmica Plana ( Pellets 15 %)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m <sup>2</sup> .°C/W)	Resistência Total (m <sup>2</sup> .°C/W)	U ( W/(m <sup>2</sup> .°C)
Estuque Interior	0,01	0,43	0,02	0,55	1,8
Betão Armado	0,25	2,00	0,13		
Reboco Exterior - Pellets 15 %	0,04	0,17	0,24		
Total	0,3	-			
Paredes Exteriores - Ponte Térmica Plana ( Pellets 23 %)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m <sup>2</sup> .°C/W)	Resistência Total (m <sup>2</sup> .°C/W)	U ( W/(m <sup>2</sup> .°C)
Estuque Interior	0,01	0,43	0,02	0,65	1,5
Betão Armado	0,25	2,00	0,13		
Reboco Exterior - Pellets 23 %	0,04	0,12	0,33		
Total	0,3	-			

Quadro 9.4 - Soluções construtivas com 6 cm de espessura: zona corrente

Paredes Exteriores - Zona Corrente ( Pellets 4 %)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U ( W/(m².°C)
Estuque Interior	0,04	0,43	0,09	0,89	1,1
Tijolo Cerâmico	0,22	-	0,52		
Reboco Exterior - Pellets 4 %	0,06	0,56	0,11		
Total	0,32		-		
Paredes Exteriores - Zona Corrente ( Pellets 9 %)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U ( W/(m².°C)
Estuque Interior	0,04	0,43	0,09	1,02	1,0
Tijolo Cerâmico	0,22	-	0,52		
Reboco Exterior - Pellets 9 %	0,06	0,25	0,24		
Total	0,32		-		
Paredes Exteriores - Zona Corrente ( Pellets 15 %)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U ( W/(m².°C)
Estuque Interior	0,04	0,43	0,09	1,14	0,9
Tijolo Cerâmico	0,22	-	0,52		
Reboco Exterior - Pellets 15 %	0,06	0,17	0,35		
Total	0,32		-		
Paredes Exteriores - Zona Corrente ( Pellets 23 %)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U ( W/(m².°C)
Estuque Interior	0,04	0,43	0,09	1,28	0,8
Tijolo Cerâmico	0,22	-	0,52		
Reboco Exterior - Pellets 23 %	0,06	0,12	0,50		
Total	0,32		-		
Paredes Exteriores - Zona Corrente ( Solução composta)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U ( W/(m².°C)
Estuque Interior	0,04	0,43	0,09	1,22	0,82
Tijolo Cerâmico	0,22	-	0,52		
Reboco camada base - Pellets 23 %	0,05	0,12	0,42		
Reboco camada acabamento - Pellets 4	0,01	0,56	0,02		
Total	0,32		-		

Quadro 9.3 - Soluções construtivas com 6 cm de espessura: ponte térmica plana

Paredes Exteriores - Ponte Térmica Plana ( Pellets 4 %)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U ( W/(m².°C)
Estuque Interior	0,01	0,43	0,02	0,43	2,4
Betão Armado	0,25	2,00	0,13		
Reboco Exterior - Pellets 4 %	0,06	0,56	0,11		
Total	0,32		-		
Paredes Exteriores - Ponte Térmica Plana ( Pellets 9 %)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U ( W/(m².°C)
Estuque Interior	0,01	0,43	0,02	0,56	1,8
Betão Armado	0,25	2,00	0,13		
Reboco Exterior - Pellets 9 %	0,06	0,25	0,24		
Total	0,32		-		
Paredes Exteriores - Ponte Térmica Plana ( Pellets 15 %)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U ( W/(m².°C)
Estuque Interior	0,01	0,43	0,02	0,67	1,5
Betão Armado	0,25	2,00	0,13		
Reboco Exterior - Pellets 15 %	0,06	0,17	0,35		
Total	0,32		-		
Paredes Exteriores - Ponte Térmica Plana ( Pellets 23 %)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U ( W/(m².°C)
Estuque Interior	0,01	0,43	0,02	0,82	1,2
Betão Armado	0,25	2,00	0,13		
Reboco Exterior - Pellets 23 %	0,06	0,12	0,50		
Total	0,32		-		
Paredes Exteriores - Ponte Térmica Plana ( Solução composta)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U ( W/(m².°C)
Estuque Interior	0,01	0,43	0,02	0,75	1,33
Betão Armado	0,25	2,00	0,13		
Reboco camada base - Pellets 23 %	0,05	0,12	0,42		
Reboco camada acabamento - Pellets 4	0,01	0,56	0,02		
Total	0,32		-		



Quadro 9.6 – Soluções construtivas com 8 cm de espessura: zona corrente

Paredes Exteriores - Zona Corrente ( Pellets 4 %)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U ( W/(m².°C)
Estuque Interior	0,04	0,43	0,09	0,93	1,1
Tijolo Cerâmico	0,22	-	0,52		
Reboco Exterior - Pellets 4 %	0,08	0,56	0,14		
Total	0,34		-		
Paredes Exteriores - Zona Corrente ( Pellets 9 %)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U ( W/(m².°C)
Estuque Interior	0,04	0,43	0,09	1,10	0,9
Tijolo Cerâmico	0,22	-	0,52		
Reboco Exterior - Pellets 9 %	0,08	0,25	0,32		
Total	0,34		-		
Paredes Exteriores - Zona Corrente ( Pellets 15 %)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U ( W/(m².°C)
Estuque Interior	0,04	0,43	0,09	1,25	0,8
Tijolo Cerâmico	0,22	-	0,52		
Reboco Exterior - Pellets 15 %	0,08	0,17	0,47		
Total	0,34		-		
Paredes Exteriores - Zona Corrente ( Pellets 23 %)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U ( W/(m².°C)
Estuque Interior	0,04	0,43	0,09	1,45	0,7
Tijolo Cerâmico	0,22	-	0,52		
Reboco Exterior - Pellets 23 %	0,08	0,12	0,67		
Total	0,34		-		
Paredes Exteriores - Zona Corrente ( Solução composta)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U ( W/(m².°C)
Estuque Interior	0,04	0,43	0,09	1,32	0,76
Tijolo Cerâmico	0,22	-	0,52		
Reboco camada base - Pellets 23 %	0,06	0,12	0,50		
Reboco camada acabamento - Pellets 4	0,02	0,56	0,04		
Total	0,34		-		

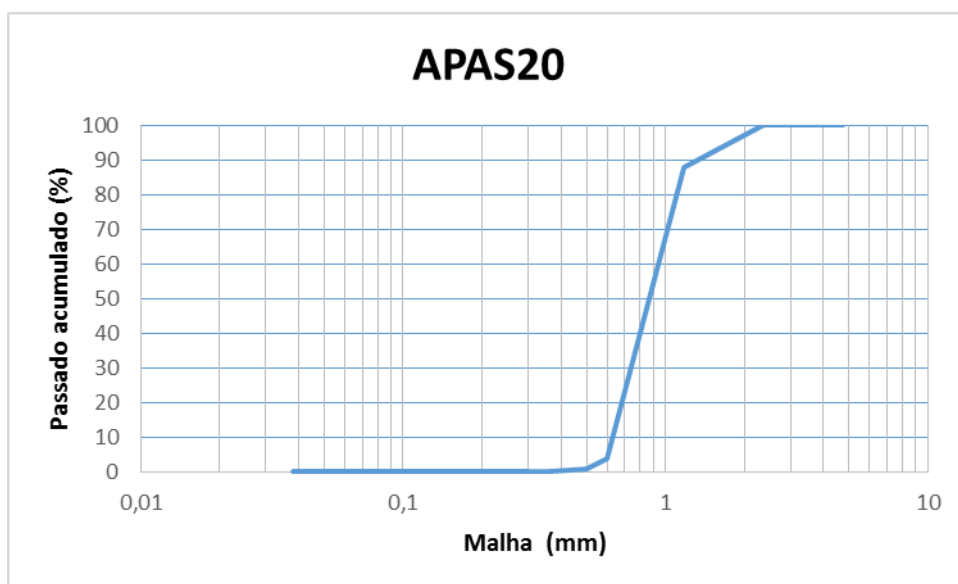
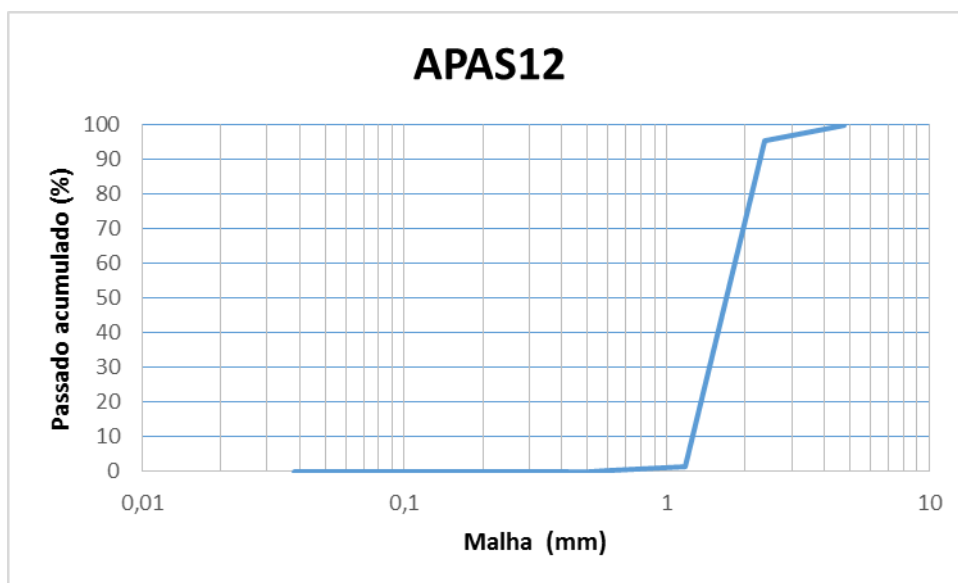
Quadro 9.5 - Soluções construtivas com 8 cm de espessura: ponte térmica plana

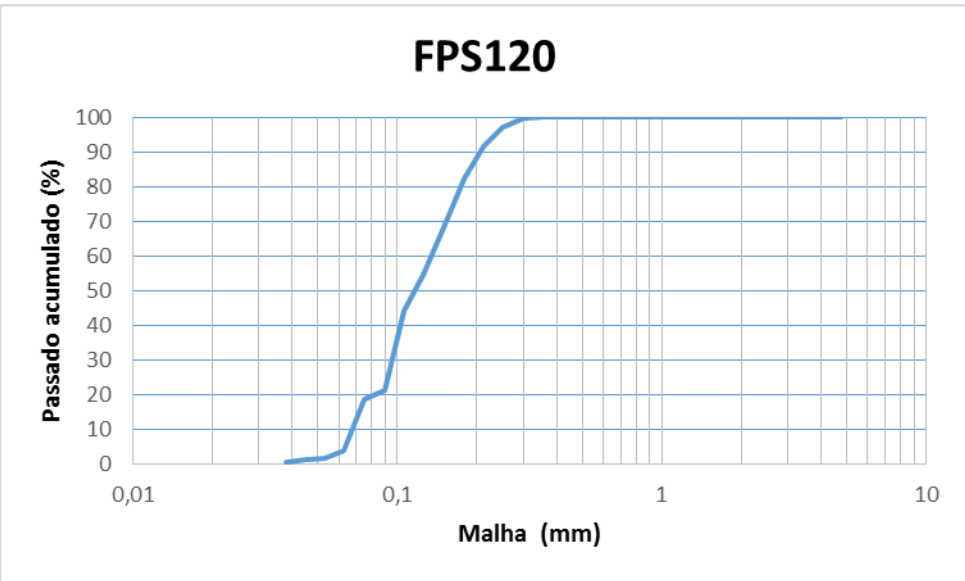
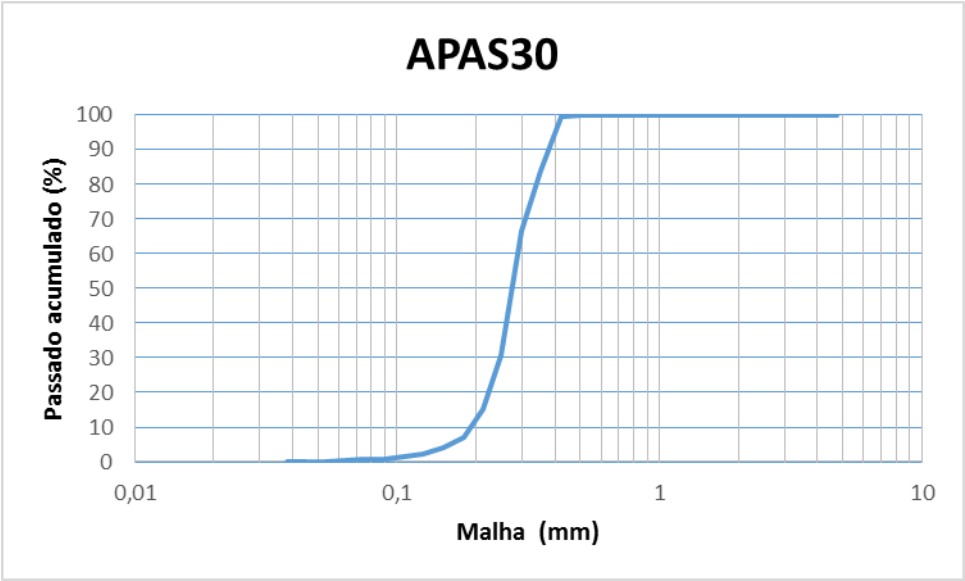
Paredes Exteriores - Ponte Térmica Plana ( Pellets 4 %)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U ( W/(m².°C)
Estuque Interior	0,01	0,43	0,02	0,46	2,2
Betão Armado	0,25	2,00	0,13		
Reboco Exterior - Pellets 4 %	0,08	0,56	0,14		
Total	0,34		-		
Paredes Exteriores - Ponte Térmica Plana ( Pellets 9 %)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U ( W/(m².°C)
Estuque Interior	0,01	0,43	0,02	0,64	1,6
Betão Armado	0,25	2,00	0,13		
Reboco Exterior - Pellets 9 %	0,08	0,25	0,32		
Total	0,34		-		
Paredes Exteriores - Ponte Térmica Plana ( Pellets 15 %)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U ( W/(m².°C)
Estuque Interior	0,01	0,43	0,02	0,79	1,3
Betão Armado	0,25	2,00	0,13		
Reboco Exterior - Pellets 15 %	0,08	0,17	0,47		
Total	0,34		-		
Paredes Exteriores - Ponte Térmica Plana ( Pellets 23 %)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U ( W/(m².°C)
Estuque Interior	0,01	0,43	0,02	0,98	1,0
Betão Armado	0,25	2,00	0,13		
Reboco Exterior - Pellets 23 %	0,08	0,12	0,67		
Total	0,34		-		
Paredes Exteriores - Ponte Térmica Plana ( Solução composta)					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m².°C/W)	Resistência Total (m².°C/W)	U ( W/(m².°C)
Estuque Interior	0,01	0,43	0,02	0,85	1,17
Betão Armado	0,25	2,00	0,13		
Reboco camada base - Pellets 23 %	0,06	0,12	0,50		
Reboco camada acabamento - Pellets 4	0,02	0,56	0,04		
Total	0,34		-		

Quadro 9.7 - Solução construtiva: cobertura com pellets

Cobertura não transitável ( apenas manutenção) - Pellets 23 %					
Material	Espessura (m)	$\lambda$ (W/m.°C)	Resistência Térmica (m <sup>2</sup> .°C/W)	Resistência Total (m <sup>2</sup> .°C/W)	U ( W/(m <sup>2</sup> .°C)
Estuque Interior	0,03	0,43	0,07	1,17	0,86
Betão	0,20	2,00	0,10		
Camada de forma - Pellets 23 %	0,10	0,12	0,83		
Sistema de Impermeabilização	-	-	-		
Manta Geotextil	-	-	-		
Seixo Rolado	0,05	2,00	0,03		
Total	0,38	-			

## A2. Curvas Granulométricas – Areias





**A3. Documentos Técnicos**

- Ficha Técnica Cal Hidraulica HL5 ;
- Ficha Técnica Superplasticante CHRYSO®Fluid Premia 180;
- Declaração de desempenho – APAS 12; APAS 20 ; APAS 30 ; FPS 120